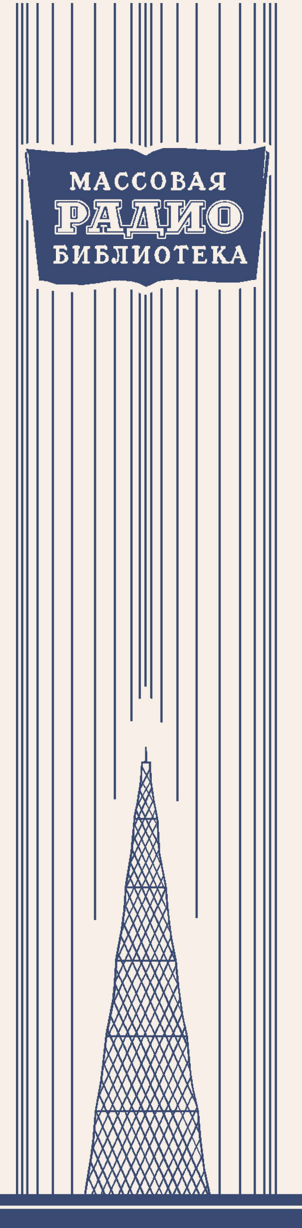
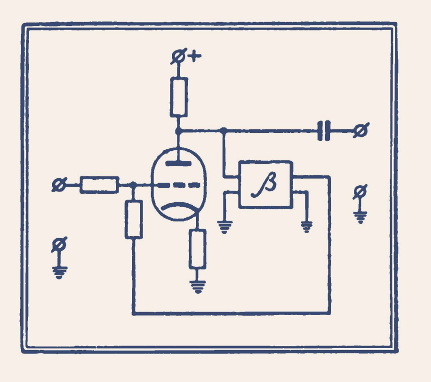


И. Г. ГОЛЬДРЕЕР

ЛАМПОВЫЙ КАСКАД С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ





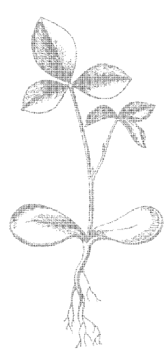
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ
1954

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 201

И. Г. ГОЛЬДРЕЕР

ЛАМПОВЫЙ КАСКАД С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1954 ЛЕНИНГРАД

В книге рассматриваются свойства ламповых каскадов с различными видами обратной связи, даются примеры принципиальных и практических схем различных ламповых каскадов с обратной связью и приводятся некоторые расчетные данные.

Книга предназначена для подготовленных радиолюбителей.

Редактор *А. Х. Якобсон* Техн. редактор *К. П. Воронин*

Сдано в набор 4/II 1954 г. Подписано к печати 8/IV 1954 г.
Бумага $82\times108\,^{1}/_{32}$ 4,51 печ. л. Уч.-изд. л. 5.
Т-00294 Тираж 25 000 экз. Цена 2 руб. Зак. № 1063.

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Советские радиолюбители проводят большую творческую работу. Они конструируют, изготовляют и ремонтируют радиоприемники, радиопередатчики, радиоузлы, телевизоры, звукозаписывающие, радиоизмерительные и другие устройства. Расширяя свою деятельность, радиолюбители стремятся применить радиотехнику в различных отраслях народного хозяйства нашей страны. Они создают новые радиотехнические устройства и вносят много ценных технических предложений. Иллюстрацией этой созидательной работы могут служить традиционные ежегодные выставки творчества радиолюбителей-конструкторов.

Чтобы радиолюбитель мог творчески работать, он должен повышать уровень своих радиотехнических знаний. Для расширения радиотехнического кругозора радиолюбителю полезно изучить ряд общих вопросов радиотехники, без которых трудно разобраться во всем многообразии радиотехнических схем. К их числу относятся вопросы применения обратных связей в ламповых каскадах, например в усилителях, генераторах синусоидальных и релаксационных колебаний, частотных модуляторах, узкополосных фильтрах и т. п.

Широкое использование обратных связей в ламповых каскадах современной радиоаппаратуры позволило улучшить ее качественные показатели, упростить конструкции и снизить стоимость радиоаппаратуры, а также дало возможность создать ряд принципиально новых устройств и приборов.

Данная книга предназначена помочь подготовленным радиолюбителям ознакомиться с различными видами обратных связей и физическими следствиями применения этих связей в ламповых каскадах. Она может служить введением к более глубоким трудам, посвященным теории различных видов обратной связи. Небольшой объем книги не позволил рассмотреть в ней применение обратных связей, охватывающих несколько ламповых каскадов, поэтому она названа «Ламповый каскад с обратной связью».

Редакция

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

ВИДЫ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Усилительный ламповый каскад является активным четырехполюсником, т. е. таким устройством, которое имеет два входных и два выходных зажима. Он передает энергию от входных зажимов к выходным и содержит источник энергии внутри себя. Этим активный четырехполюсник отличается от пассивных, не содержащих в себе источника энергии.

При наличии обратной связи часть энергии с выхода лампового четырехполюсника подается на его вход. Эта обратная передача энергии может осуществляться либо за счет искусственно создаваемых цепей обратной связи, либо за счет различного рода естественных связей, существующих между электродами лампы.

Возможны следующие виды обратной связи, осуществляемые с той или иной целью в ламповом каскаде: а) положительная (активная); б) отрицательная (активная); в) реактивная; г) комплексная (с положительной или отрицательной активной составляющей); д) нелинейная, могущая быть как активной (положительной или отрицательной), так и реактивной. Физические следствия применения обратной связи различны и зависят от ее вида.

Рассмотрим действие активных положительной и отрицательной обратных связей. Мгновенное напряжение на аноде в обычном усилительном каскаде сдвинуто по фазе на 180° относительно мгновенного напряжения на сетке. Если напряжение на сетке уменьшается (делается более отрицательным), то анодный ток тоже уменьшается. Поэтому падение напряжения на нагрузочном анодном сопротивлении уменьшается, а напряжение анода относительно катода увеличивается.

Если благодаря действию обратной связи результирующее переменное напряжение, подводимое к сетке входной

лампы, увеличивается, то обратная связь называется *положительной*, а если уменьшается, — то *отрицательной*. При отрицательной обратной связи напряжение, подаваемое с выхода, вычитается из входного; оно сдвинуто по фазе по отношению к последнему на 180°. При положительной обратной связи оно находится в фазе с входным напряжением. Эти обратные связи называются *активными* потому, что при их наличии из анодной цепи в сеточную передается некоторая мощность.

Если цепь обратной связи выполнить таким образом, чтобы напряжение обратной связи, приложенное к сетке входной лампы, отличалось по фазе от входного напряжения точно на 90 или 270°, то такая обратная связь называется *реактивной*. Она изменяет фазу и амплитуду результирующего переменного напряжения, действующего на сетку.

Если напряжение, переданное цепью обратной связи, сдвинуто относительно входного не точно на 0, 90, 180, 270°, а на любой другой угол, заключенный между ними, то такая обратная связь называется *комплексной*. Она изменяет и амплитуду и фазу результирующего входного напряжения.

В современных радиотехнических устройствах широко используются активные и комплексные обратные связи.

Процесс работы лампового каскада с обратной связью изменяется благодаря тому, что энергия усиленная лампой вновь оказывает влияние на ее управляющую сетку.

Напряжение обратной связи, поступающее из анодной цепи в сеточную, может быть приложено к сетке лампы как последовательно, так и параллельно с входным управляющим напряжением. В зависимости от этого обратную связь называют соответственно *последовательной* или *параллельной*.

Если во входную цепь усилителя подается напряжение обратной связи, пропорциональное выходному напряжению, то обратная связь носит название *обратной связи по напряжению*. Если же во входную цепь подается напряжение, пропорциональное выходному току или переменной составляющей анодного тока усилительного каскада, то обратная связь называется *обратной связью по току*.

Когда делитель напряжения в цепи обратной связи содержит нелинейные сопротивления и последние используются именно в нелинейной части своей вольтамперной характеристики, обратную связь называют *нелинейной*.

В ряде случаев напряжение обратной связи подается во входную цепь после выпрямителя, т. е. она осуществляется с преобразованием рода напряжения. Чаще всего ее применяют для того, чтобы выпрямленное напряжение воздействовало на электронные лампы с управляемыми параметрами. Такая обратная связь применяется при автоматическом регулировании усиления (АРУ), для стабилизации напряжения или частоты ламповых генераторов, выходного напряжения радиоприемных устройств и т. д.

В современных устройствах для автоматического регулирования используются и такие виды обратных связей, как *обратная связь с преобразованием физической величины и запаздывающая обратная связь.*

Обратная связь с преобразованием физической величины заключается в том, что изменение выходного напряжения лампового каскада преобразуется в изменение какой-либо физической величины, а последнее в свою очередь воздействует на схему таким образом, что приводит к изменению входного напряжения. В качестве примера можно привести автоматические регуляторы с электромеханическим преобразованием, в которых к выходу лампового каскада подключен маломощный электродвигатель, а напряжение на вход каскада подается от мостовой схемы, у которой сопротивление одного или нескольких плеч изменяется от перемещения оси двигателя. В таких регуляторах выходное напряжение лампового каскада воздействует на входное напряжение посредством электромеханической связи. Кроме электромеханической связи, могут использоваться также связи через тепловое, магнитное и электрическое поля и т. п.

В случае запаздывающей обратной связи выходное напряжение лампового каскада связано с входной его цепью через какой-либо четырехполюсник, вносящий существенное запаздывание по времени, равное нескольким периодам усиливаемого каскадом переменного напряжения.

Если обратная связь создается наличием емкостной, электронной или другой проводимости между электродами лампы, то она называется *естественной.*

Естественная обратная связь может быть положительной или отрицательной, активной или реактивной и может создавать вредный эффект или полезно использоваться.

Естественная обратная связь в ламповом каскаде образуется, например, из-за наличия междуэлектродной емкости между анодом и управляющей сеткой. Вследствие этого

усилительный каскад может самовозбудиться. При этом он перестанет выполнять возложенную на него функцию усиления и станет генератором. В этом случае действие естественной обратной связи является вредным. В других случаях обратная связь через емкость анод — сетка специально используется, например, в схеме самовозбуждающегося генератора. В этом случае естественная обратная связь является полезной.

Естественные обратные связи в лампе могут иметь место из-за того, что выводы от электродов лампы обладают некоторой, хотя и малой, индуктивностью, проявляющей себя при очень высоких частотах (в диапазонах метровых и дециметровых волн).

Если отдельные детали схемы лампового каскада выполнены и расположены так, что они электростатически или электромагнитно влияют друг на друга, то этим самым также может быть образована обратная связь, называемая часто *паразитной*. Если входной и выходной трансформаторы каскада имеют значительное рассеяние магнитного потока, то при их близком взаимном расположении могут образоваться как положительная, так и отрицательная обратные связи.

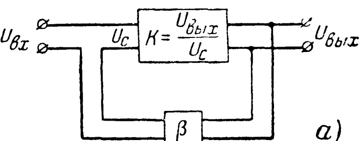
Паразитные обратные связи, охватывающие один или несколько ламповых каскадов, могут быть образованы неудачно расположенными неэкранированными деталями и монтажными проводами. Паразитная обратная связь может образоваться при общем для нескольких каскадов источнике питания. Если несколько усилительных каскадов питается от одного источника анодного напряжения, то через него проходят анодные токи всех ламповых каскадов. При отсутствии развязывающих цепей энергия из выходной цепи последующих ламповых каскадов попадает во входную цепь предыдущих, т. е. образуется обратная связь.

Для того, чтобы избежать паразитных обратных связей, необходимо применять развязывающие цепи, рационально располагать детали и монтажные провода, а также применять различные виды экранирования.

КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ КАСКАДА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Определим на примере схемы с последовательной обратной связью (фиг. 1) величину коэффициента усиления усилительного каскада с обратной связью и без нее.

Примем следующие обозначения: K — коэффициент усиления каскада без обратной связи; K_o — коэффициент усиления каскада с обратной связью; U_c — напряжение, подаваемое непосредственно на управляющую сетку лампы усилительного каскада; $U_{вх}$ и $U_{вых}$ — напряжения на входе и выходе каскада; β — коэффициент понижения напряжения цепью обратной связи (показывающий, какая часть напряжения с выхода усилителя передается обратно на входную цепь), называемый *коэффициентом обратной связи.*



Напряжение на сетке лампы

$$U_c = U_{вх} + \beta U_{вых}.$$

Подставим в это уравнение значение коэффициента усиления без обратной связи

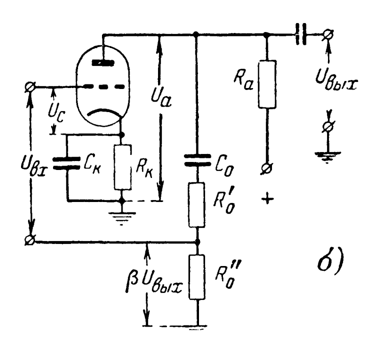
$$K = \frac{U_{вых}}{U_c}.$$

Тогда, решив его относительно $U_{вых}$, имеем:

$$U_{вых} = KU_{вх} + K\beta U_{вых}.$$

Разделив правую и левую части этого выражения на $U_{вх}$, получим:

$$K_o = K + K\beta K_o.$$



Фиг. 1. Схема каскада с последовательной обратной связью по напряжению.

а — скелетная схема; *б* — принципиальная схема.

Отсюда окончательное выражение для коэффициента усиления усилительного каскада с обратной связью

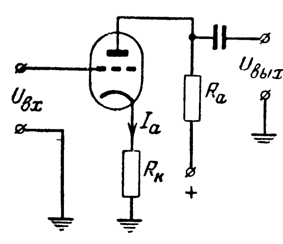
$$K_o = \frac{K}{1 - K\beta}.$$

При отрицательной обратной связи β может иметь величину от 0 до — 1, а при положительной — от 0 до 1.

Произведение $K\beta$ обычно называют *фактором обратной связи.* Оно характеризует работу лампового каскада или усилителя с обратной связью и может быть положительным или отрицательным.

Когда $\frac{1}{\omega C_0} \ll R_0' + R_0''$, в схеме (фиг. 1) действует отрицательная обратная связь и на сетку лампы подается напряжение, уменьшенное на величину $\beta U_{вых}$. Следовательно, в этом случае коэффициент усиления каскада меньше коэффициента усиления каскада при отсутствии обратной связи. Это соответствует случаю, когда $K\beta$ отрицательно. При положительной обратной связи $K\beta$ положительно и коэффициент усиления каскада повышается.

Если емкость конденсатора C_0 уменьшить до той величины, при которой $\frac{1}{\omega C_0}$ уже сравнимо с R_0' и R_0'', то напряжение обратной связи будет повернуто по фазе по отношению к $U_{вх}$ на угол, меньший 180°. Тогда в схеме будет действовать комплексная обратная связь. При этом $\beta U_{вх}$ будет зависеть от частоты усиливаемых колебаний.



Фиг. 2. Схема каскада с последовательной обратной связью по току.

Конденсатор C_0 в рассмотренной схеме с отрицательной обратной связью необходим для того, чтобы не пропустить в сеточную цепь постоянную составляющую анодного напряжения, чтобы сетка не оказалась под положительным потенциалом. В этой схеме во входную цепь усилителя подается напряжение обратной связи, являющееся частью анодного напряжения; поэтому обратная связь такого типа является обратной связью по напряжению.

Схема усилительного лампового каскада с отрицательной обратной связью по току показана на фиг. 2. Напряжение обратной связи здесь снимается с сопротивления $R_к$. Так как падение напряжения на этом сопротивлении пропорционально анодному току, то в сеточную цепь лампы вводится, таким образом, напряжение обратной связи, величина которого пропорциональна анодному току.

В некоторых случаях применяется смешанная или комбинированная обратная связь; при этом в сеточную цепь поступает одновременно некоторое напряжение, пропорциональное анодному току и, кроме того, часть анодного напряжения. Если в схеме фиг. 1 отключить конденсатор $C_к$, подключенный к сопротивлению $R_к$, то в ней будет

действовать отрицательная обратная связь как по току, так и по напряжению. При очень глубокой отрицательной обратной связи, когда $K\beta \gg 1$, единицей в знаменателе формулы $K_o = \frac{K}{1 - K\beta}$ можно пренебречь, и, сократив K, можно написать:

$$K_o = \frac{1}{\beta}.$$

Из последней формулы следует, что коэффициент усиления в этом случае может быть меньше или равен единице. Ламповый каскад в таком режиме обратной связи обладает весьма ценными свойствами и нашел исключительно широкое применение.

При положительной обратной связи, в случае когда фактор обратной связи $K\beta = 1$, знаменатель формулы для K_o становится равным нулю и коэффициент усиления каскада обращается в бесконечность. Это значит, что даже при отсутствии напряжения $U_{вх}$ (зажимы, к которым подводится $U_{вх}$, замкнуты накоротко) выходное напряжение будет иметь какое-то конечное значение. Усилительный каскад в этом случае превращается в ламповый генератор, преобразующий энергию постоянного тока, получаемую от батареи, в энергию переменного тока. Генерирование электрических колебаний с помощью положительной обратной связи широко используется в современной радиотехнике.

ЛАМПА КАК УНИВЕРСАЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Виды сопротивлений. Прежде чем показать, что электронная лампа может представлять собой универсальное сопротивление (т. е. что с ее помощью могут быть получены сопротивления любого вида), напомним существующие виды электрических сопротивлений.

Любое электрическое сопротивление или электрическая схема, имеющая два зажима (полюса), называется *двухполюсником*. Любой генератор тоже является двухполюсником (активным). Если в двухполюснике, кроме сопротивлений, содержится генератор, то он называется *активным*. Двухполюсник, не содержащий генератора, называется *пассивным*.

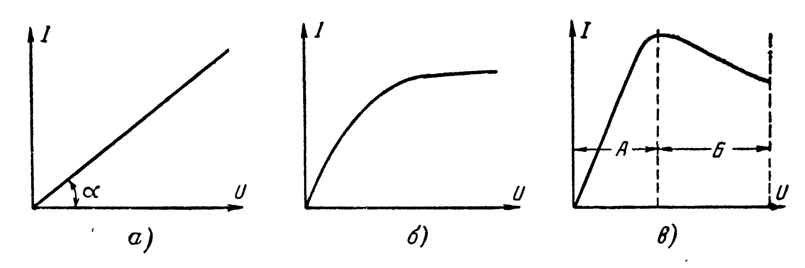
Любой двухполюсник характеризуется двумя зависимостями:

1) зависимостью тока от приложенного к нему напряжения (вольтамперной характеристикой) $I=\varphi(U)$;

2) зависимостью тока от частоты при постоянстве приложенного переменного напряжения $I=\varphi(f)$ при $U=\text{const}$.

Вольтамперная характеристика показывает, является ли данное сопротивление *линейным* или *нелинейным, положительным* или *отрицательным*. Она показывает, зависит ли величина сопротивления от проходящего через него тока или приложенного напряжения или не зависит, а если зависит, то как.

Падение напряжения на линейном сопротивлении прямо пропорционально величине проходящего через него тока. Вольтамперная характеристика такого сопротивления изображается прямой линией (фиг. 3,*а*). Величина этого сопро-



Фиг. 3. Вольтамперные характеристики электрических сопротивлений. *а* — линейного; *б* — нелинейного; *в* — отрицательного (на участке *Б*).

тивления $R=\frac{U}{I}$ определяется котангенсом угла α наклона характеристики и не зависит от величины тока, проходящего по сопротивлению.

У нелинейного сопротивления вольтамперная характеристика изображается кривой линией, например показанной на фиг. 3,*б*. Величина такого сопротивления с изменением тока или приложенного напряжения изменяется, в чем можно убедиться, взяв отношение $\frac{U}{I}=R$ для разных точек кривой фиг. 3,*б* или измерив угол наклона этой кривой в разных точках.

Нелинейными реактивными сопротивлениями, например, являются катушки индуктивности, имеющие стальной сердечник, используемый в режиме, близком к насыщению стали, конденсаторы со специальным диэлектриком, например с титанатом бария, диэлектрическая проницаемость которо-

го зависит от величины прикладываемого к нему напряжения, и т. п.

Рассмотренные сопротивления называются положительными. С возрастанием проходящего через них тока растет и падение напряжения. Если же с ростом тока падение напряжения на сопротивлении уменьшается, то оно называется отрицательным. Вольтамперная характеристика одного из таких сопротивлений представлена на фиг. 3,*в*. Отрицательным это сопротивление является в области *Б*, где с ростом приложенного напряжения ток уменьшается.

Если включить отрицательное сопротивление в электрическую цепь последовательно с каким-либо положительным сопротивлением, то увеличение тока в этой цепи будет вызывать уменьшение падения напряжения на отрицательном сопротивлении. Соответственно, вследствие того что сумма падений напряжения на положительном и отрицательном сопротивлениях постоянна, это будет вызывать увеличение падения напряжения на положительном сопротивлении. Таким образом, отрицательное сопротивление не расходует энергии, а как бы вносит свою энергию в цепь. Поэтому оно и названо отрицательным. В действительности в электрических цепях с отрицательными сопротивлениями используется только энергия имеющихся в них источников тока, отрицательные же сопротивления содействуют определенному ее перераспределению между элементами электрической цепи.

Понятие об отрицательном сопротивлении было введено в 1918 г. одним из основателей отечественной радиотехники проф. М. А. Бонч-Бруевичем.

Зависимость тока через сопротивление от частоты характеризует частотные свойства сопротивления. По своим частотным свойствам электрические сопротивления подразделяются на *активные*, *реактивные* и *комплексные*. В активных сопротивлениях электрическая энергия расходуется, а реактивные сопротивления запасают ее в одни моменты времени и отдают обратно генератору в другие. Понятие о реактивном сопротивлении действительно лишь для переменного напряжения или переходного режима при включении или выключении постоянного напряжения. Комплексное сопротивление имеет две составляющие: активную и реактивную. Оно как бы состоит из двух видов сопротивлений.

Реактивные сопротивления бывают, как известно, емкостными и индуктивными. Практически чисто реактивных сопротивлений, не содержащих никаких активных составляю-

щих, не существует, потому что в любом из них расходуется, хотя бы и небольшая, энергия. Например, в катушке индуктивности энергия расходуется на нагрев провода, а в конденсаторах происходят потери энергии в диэлектрике.

Реактивные или комплексные сопротивления в то же время могут быть и нелинейными.

Известно, что при включении в цепь переменного тока реактивного сопротивления, т. е. емкости или индуктивности, создается соответствующий сдвиг фаз между током и напряжением, приложенным к этому сопротивлению. Кроме того, величина реактивного сопротивления, оказываемого емкостью или индуктивностью, зависит от частоты. Так, реактивное сопротивление емкости уменьшается с ростом частоты, а индуктивности — увеличивается.

С помощью электронной лампы можно создать двухполюсник, вызывающий в цепи переменного тока такой же сдвиг фаз между током и напряжением, как и при включении индуктивности, но реактивное сопротивление которого уменьшается с ростом частоты. Такой двухполюсник называют *отрицательной емкостью* или *обратной индуктивностью*. Точно так же можно создать двухполюсник, создающий такой же сдвиг фаз между током и напряжением, как и емкость, но реактивное сопротивление которого увеличивается с ростом частоты. Этот двухполюсник называют *отрицательной индуктивностью* или *обратной емкостью*.

Для того чтобы выяснить, каким образом с помощью ламп могут быть созданы такие двухполюсники, сначала рассмотрим параллельное соединение нескольких сопротивлений, одни из которых являются активными, а другие — реактивными.

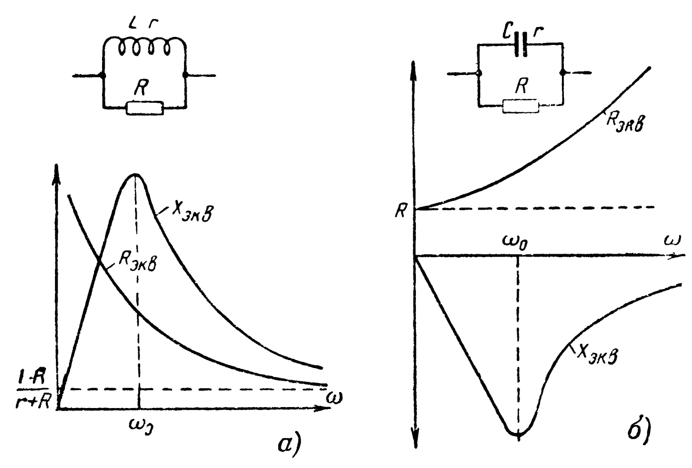
Нас будут интересовать два случая параллельного соединения сопротивлений: катушки индуктивности L и активного сопротивления R в одном случае (фиг. 4,*а*), а также конденсатора C и активного сопротивления R — в другом (фиг. 4,*б*). Считаем, что катушка индуктивности и конденсатор обладают потерями; поэтому последовательно с их чисто реактивными сопротивлениями как бы включены небольшие активные сопротивления r.

Рассмотрим зависимость величин эквивалентных реактивных и активных сопротивлений этих двухполюсников от частоты. При очень малых частотах эквивалентное реактивное сопротивление $X_{экв}$ схемы фиг. 4,*а* мало, так как $\omega L \ll R$ и индуктивность почти не влияет на ток. С ростом частоты это влияние возрастает и $X_{экв}$ увеличивается. При

некоторой частоте $\omega = \omega_0$ величины ωL и R становятся равными. При дальнейшем увеличении частоты ω сопротивление R все больше шунтирует катушку индуктивности L, вследствие чего $X_{экв}$ уменьшается.

Эквивалентное активное сопротивление $R_{экв}$ этой схемы с ростом частоты уменьшается, приближаясь к значению $\frac{r \cdot R}{r+R}$.

Эквивалентное реактивное сопротивление $X_{экв}$ схемы фиг. 4,*б* на малых частотах мало из-за того, что ток в этом случае практически определяется лишь током че-



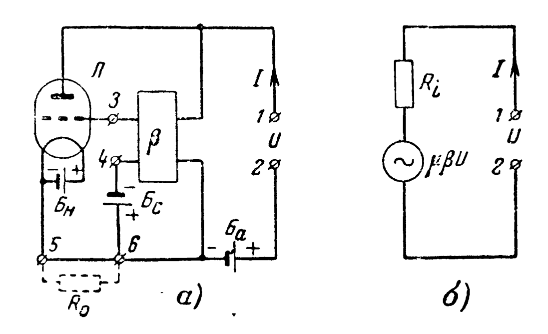
Фиг. 4. Зависимости эквивалентных сопротивлений $R_{экв}$ и $X_{экв}$ от частоты для двух схем параллельного соединения сопротивлений.

рез R. С ростом частоты ток через емкостную ветвь увеличивается и $X_{экв}$ растет. Затем при частоте $\omega = \omega_0$ токи через R и емкостную ветвь становятся равными. При дальнейшем возрастании частоты $X_{экв}$ уменьшается потому, что сопротивление $\frac{1}{\omega C}$ становится меньше, чем R, и шунтирующее действие последнего ослабляется.

Эквивалентное активное сопротивление $R_{экв}$ этой схемы при частоте $\omega = 0$ равно R, так как при этом сопротивление емкостной ветви равно бесконечности и ток через нее не проходит. С ростом частоты $R_{экв}$ увеличивается.

Рассмотренный двухполюсник, содержащий L, r и R, на частотах, бо́льших ω_0, представляет собой отрицательную емкость, а двухполюсник, образованный C, r и R, при частотах, меньших ω_0, является отрицательной индуктивностью.

При использовании в ламповом каскаде реактивной обратной связи можно создать сдвиг фаз между переменным анодным напряжением и переменным анодным током лампы. Таким образом, она будет представлять собой реактивное сопротивление, равное отношению падения переменного напряжения на ней к величине переменного тока. Так как внутреннее сопротивление лампы R_i оказывает некоторое



Фиг. 5. Принципиальная и эквивалентная схемы электронной лампы с источником питания и обратной связью по напряжению.

шунтирующее действие, то в отдельных случаях оно может привести к тому, что лампа будет эквивалентна отрицательному реактивному сопротивлению.

Электронную лампу можно также поставить в режим, при котором она будет являться комплексным нелинейным сопротивлением. Это можно сделать за счет применения обратной связи и выбора рабочей точки в нелинейной части характеристики лампы.

Лампа как сопротивление при различных видах обратной связи. На схеме фиг. 5,*а* показана лампа *Л*, источники ее питания $Б_н$, $Б_c$ и $Б_a$, а также цепь обратной связи по напряжению, имеющая коэффициент обратной связи β. К анодной цепи лампы приложено переменное напряжение U. Через лампу проходит переменный анодный ток I.

Сопротивление, создаваемое лампой переменному току на зажимах *1* и *2*, можно найти из эквивалентной схемы, приведенной на фиг. 5,*б*. Она построена на основании того, что лампу, используемую в режиме класса А, можно заменить генератором, создающим переменную э. д. с., равную μU_c и имеющим внутреннее сопротивление R_i, которое определяется в рабочей точке характеристики лампы. Поясним возможность такой замены. Если к источнику напряжения постоянного тока подключить два последовательно соединенных сопротивления и величину одного из них каким-либо образом периодически изменять, то ток в цепи будет периодически изменяться. В качестве периодически изменяющегося сопротивления можно использовать, например, лампу, подавая на ее сетку соответствующее переменное напряжение.

Вследствие появления в цепи переменной составляющей тока можно условно считать, что величина сопротивления, которая периодически изменялась оставаясь неизменной, а в цепь добавлен новый источник э. д. с. переменного тока, за счет которого и образуется переменная составляющая тока. Таким образом, если имеется последовательное соединение электронной лампы и сопротивления, то это соединение можно заменить эквивалентной схемой, содержащей два сопротивления (одно из них R_i — внутреннее сопротивление лампы) и генератор переменной э. д. с. величина э. д. с. генератора за счет усилительных свойств лампы оказывается равной μU_c.

В схеме фиг. 5,*а* напряжение на сетке лампы $U_c = \beta U$, поэтому на эквивалентной схеме фиг. 5,*б* показан источник напряжения с э. д. с., равной $\mu\beta U$. Источники постоянного напряжения $Б_a$ и $Б_c$ необходимы в схеме для обеспечения нормального режима работы лампы, с тем чтобы она представляла одинаковое сопротивление для каждого из полупериодов приложенного к ней переменного напряжения.

Ток I в анодной цепи лампы зависит от величины приложенного напряжения U, а также от величины и фазы напряжения $\mu\beta U$. Последнее может быть в фазе, противофазе или сдвинуто на какой-либо другой угол относительно напряжения U.

Пусть напряжение $\mu\beta U$ находится в противофазе с напряжением U; тогда ток в цепи уменьшится (он может даже стать равным нулю), что соответствует увеличению сопротивления, создаваемого лампой. При этом в схеме

осуществляется положительная обратная связь по напряжению. В этом случае анодный ток лампы

$$I = \frac{U - \mu\beta U}{R_i} = \frac{U(1 - \mu\beta)}{R_i},$$

а сопротивление, оказываемое ею для переменного тока, создаваемого за счет источника напряжения U,

$$R_{io} = \frac{U}{I} = \frac{R_i}{1 - \mu\beta}.$$

При $\mu\beta = 1$ $R_{io} = \infty$ и переменный ток в цепи отсутствует.

Если $\mu\beta U$ находится в фазе с U, то ток I увеличится, что эквивалентно уменьшению сопротивления R_{io}. Оно в этом случае становится равным

$$R_{io} = \frac{1}{1 + \mu\beta} \cdot R_i.$$

Так как лампа осуществляет поворот по фазе на 180°, то если $\mu\beta U$ находится в фазе с U, напряжение U_c находится в противофазе с U и в фазе с напряжением на аноде лампы (так как последнее всегда в противофазе с U). В схеме при этом осуществляется отрицательная обратная связь.

В схеме фиг. 5,*а* применена обратная связь по напряжению; поэтому можно сказать, что отрицательная обратная связь по напряжению уменьшает внутреннее сопротивление лампы, а положительная обратная связь по напряжению увеличивает его.

Если в схеме фиг. 5,*а* замкнуть накоротко зажимы *3* и *4*, предварительно отключив от них четырехполюсник обратной связи β, разомкнуть зажимы *5* и *6* и подключить к ним сопротивление R_o, то в схеме будет осуществлена отрицательная обратная связь по току. За счет применения отрицательной обратной связи по току внутреннее сопротивление лампы повышается и становится равным

$$R_{io} = R_i(1 + SR_o),$$

где S — крутизна лампы, а R_o — сопротивление, участвующее в создании обратной связи.

Положительную обратную связь по току в этой схеме можно осуществить, сдвинув по фазе напряжение на сетке на 180°. Это можно сделать с помощью трансформатора.

В случае положительной обратной связи по току внутреннее сопротивление лампы понижается и становится равным

$$R_{io} = R_i(1 - SR_o).$$

Если в схеме фиг. 5,*а* между зажимами *5* и *6* включено сопротивление R_o, а четырехполюсник β также остается включенным, то в ней одновременно осуществляются отрицательные обратные связи по току и напряжению. При этом лампа, охваченная такой цепью обратной связи, оказывает сопротивление

$$R_{io} = R_i \frac{1 + R_o S(1-\beta)}{1 + \mu\beta}.$$

Если напряжение источника $\mu\beta U$ сдвинуто по фазе по отношению к U на угол, лежащий в пределах 0÷90 и 270÷360°, то лампа представляет собой комплексное сопротивление, состоящее из реактивной и активной частей. Реактивная его часть при угле, лежащем в пределах 0÷90°, является индуктивной, а в пределах 270÷360° — емкостной; активная же часть в обоих случаях представляет собой обычное положительное сопротивление.

Если $\mu\beta U$ сдвинуто по фазе по отношению к U на угол, лежащий в пределах 90÷180 и 180÷270°, то лампа представляет собой также комплексное сопротивление. В одном случае его реактивная часть является индуктивной, в другом — емкостной. Активная же часть в обоих этих случаях представляет собой отрицательное сопротивление.

Когда угол сдвига фаз между $\mu\beta U$ и U отличается от 0 и 180°, его можно подобрать таким, чтобы активная часть эквивалентного сопротивления лампы равнялась нулю. Лампа тогда будет представлять собой чисто реактивное сопротивление.

Цепь, осуществляющая комплексную обратную связь, может быть выбрана такой, чтобы лампа представляла собой параллельное соединение двух реактивных сопротивлений различного вида. Комплексная обратная связь подобного типа широко используется.

Сопротивления различного вида, создаваемые с помощью электронной лампы, отличаются от обычных сопротивлений тем, что их величину можно изменять с помощью напряжения, прикладываемого к одной из сеток лампы. Кроме того, их достоинством является и то обстоятельство, что индуктивные сопротивления могут быть получены с по-

мощью лампы и цепи обратной связи, не содержащей катушки индуктивности, что во многих случаях, например при низких частотах, представляет исключительный интерес.

Регулирование тока посредством реостатов, переменных конденсаторов и вариометров не может быть безинерционным и непригодно для быстродействующей аппаратуры. Лампа как управляемое сопротивление может изменять свои параметры с исключительной быстротой. Она может работать при управляющих напряжениях на сетке, имеющих частоту порядка миллионов герц. При разработке различных радиотехнических устройств учитывают рассмотренные возможности использования электронных ламп в схемах и стремятся рационально выбрать как режим их работы, так и типы и глубину обратных связей.

КАСКАД С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

ВИДЫ ИСКАЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В КАСКАДЕ

Каждому усилительному каскаду в какой-то степени свойственно искажать усиливаемый сигнал. Искажение усиливаемого сигнала переменного тока выражается в том, что форма кривой выходного напряжения отличается от формы кривой входного напряжения.

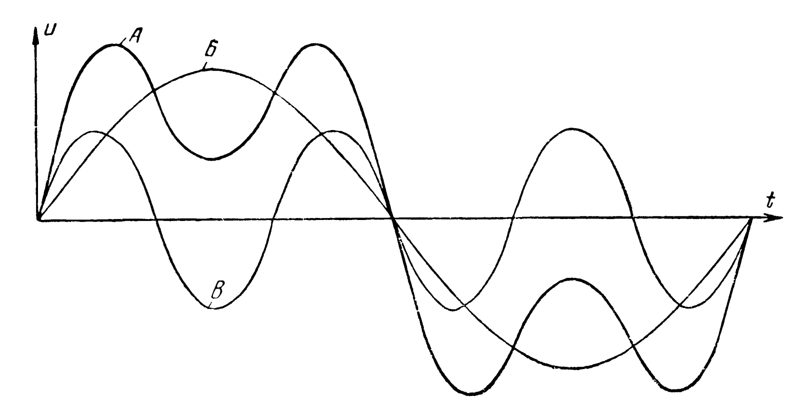
Коэффициент усиления усилительного каскада может изменяться под влиянием внутренних и внешних воздействий на элементы каскада. Кроме того, во входную цепь усилителя могут поступать извне (наводиться) посторонние сигналы. Последние в ряде случаев могут быть усилены так же, как и основной сигнал.

Искажения, возникающие в усилительном устройстве, обычно подразделяют на *частотные*, *амплитудные* (или нелинейные) и *фазовые*. Все они связаны с тем, что изменение параметров имеющихся в схеме реактивных или нелинейных сопротивлений ведет к изменению коэффициента усиления каскада. Последний при изменении частоты подводимого напряжения может изменяться, например, из-за изменения сопротивления переходных конденсаторов в зависимости от частоты.

При изменении амплитуды входного напряжения коэффициент усиления может изменяться в случае, если лампа

используется в нелинейном режиме, когда оба полупериода переменного напряжения или даже различные части одного и того же полупериода усиливаются с разными коэффициентами усиления. Примером этому может служить работа на криволинейном участке анодно-сеточной характеристики лампы, когда при больших напряжениях переменного тока, подводимых к сетке лампы, верхняя часть одного полупериода будет соответствовать линейному участку характеристики, а верхняя часть другого просто отсечется.

Если усиливается напряжение синусоидальной формы, но изменяющейся частоты, то форма выходного напряже-



Фиг. 6. Разложение кривой *А* несинусоидальной формы на гармонические составляющие *Б* и *В*.

ния при наличии частотных искажений останется синусоидальной, а при наличии нелинейных искажений — существенно изменится.

Рассмотрим, как частотные искажения влияют на изменение формы кривой усиливаемого напряжения. Несинусоидальное напряжение любой формы может быть представлено состоящим из ряда синусоидальных напряжений, называемых гармониками. С целью пояснения этого обратимся к кривым фиг. 6, из которых видно, что напряжение несинусоидальной формы *А* может быть представлено как сумма двух синусоидальных напряжений *Б* и *В*. Напряжения более сложной формы могут состоять из значительно большего количества гармоник. Частота каждой из них кратна основной — первой гармонике.

Изменение формы кривой за счет частотных искажений, происходит в этом случае потому, что каждая из гармоник по-разному усилится и суммарное напряжение усиленных гармоник изменится.

Фазовые искажения непосредственно связаны с частотными. Они возникают при изменении частоты входного сигнала и приводят к тому, что выходное и входное напряжения сдвинуты друг по отношению к другу на каждой частоте по-разному. Это объясняется тем, что делители напряжения, имеющиеся в усилительном устройстве, кроме активных, содержат также и реактивные сопротивления. Последние, сдвигая по фазе напряжение, соответственно вызывают сдвиг по фазе как между входным и выходным напряжениями делителя, так и между входным и выходным напряжениями усилителя. В некоторых случаях, например в телевизионных устройствах, фазовые искажения недопустимы. При усилении несинусоидальных напряжений фазовые искажения, так же как и частотные, приводят к искажениям формы выходного напряжения.

Изменения коэффициента усиления лампового каскада происходят также из-за колебаний величин напряжения питания электродов лампы, потому что от этих величин зависят параметры лампы. Пусть, например, уменьшится напряжение накала лампы усилительного каскада; при этом форма кривой его выходного напряжения может и не измениться, но величина его изменится. В случае применения усилительных каскадов в различного рода измерительных устройствах даже незначительные колебания коэффициента усиления могут быть недопустимы вследствие вызываемой ими погрешности.

ОСЛАБЛЕНИЕ ИСКАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

С помощью отрицательной обратной связи можно существенно ослабить частотные, фазовые и амплитудные искажения, а также искажения за счет пульсаций напряжений, питающих анодные и накальные цепи усилительного устройства.

Напряжение, поступающее во входную цепь усилителя со стороны его выхода, можно представить как сумму нескольких напряжений: напряжения, имеющего в точности ту же форму, что и входное, и напряжений других частот, появившихся в результате искажений и помех. При нали-

чии отрицательной обратной связи на сетку лампы первого каскада усилительного устройства поступает разность напряжений $U_{вх} - \beta U_{вых}$. Вследствие этого происходит ослабление как основного — входного — сигнала, так и всех других составляющих, поступивших из выходной цепи.

Ослабление основного сигнала можно компенсировать увеличением входного напряжения. Таким образом, можно повысить соотношение между полезным сигналом и вредными напряжениями на выходе усилительного устройства. Это является одним из основных достоинств отрицательной обратной связи. Введение последней уменьшает нелинейные, частотные и фазовые искажения, фон переменного тока, а также величину усиления в $1 + \beta K$ раз.

За счет того что с помощью отрицательной обратной связи можно уменьшить нелинейные искажения, становится возможным поставить каскады усиления мощности усилительных устройств в наиболее экономичный режим. При этом значительно повышаются к. п. д. и полезная мощность усилительного устройства.

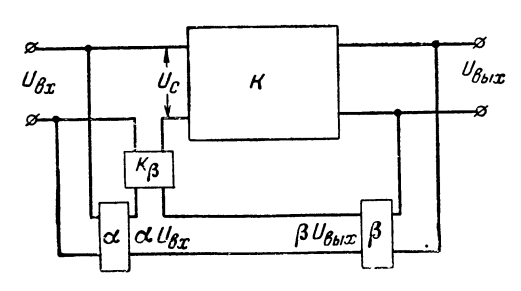
Применение отрицательной обратной связи в каскадах усиления напряжения позволяет создать высококачественные усилительные устройства, работающие с очень малыми частотными искажениями. Достигается это, правда с помощью большего, чем обычно, числа каскадов, так как каждый каскад работает со значительно меньшим коэффициентом усиления, чем тот, с которым он мог бы работать при отсутствии обратной связи.

Фон на выходе усилительного устройства, создаваемый пульсациями напряжений источников питания, снижается только при правильном составлении схем с отрицательной обратной связью. В противном случае ослабления фона не произойдет и может быть даже произойдет его усиление. Это будет иметь место в таких схемах, где напряжение пульсаций поступает на сетку и анод лампы в той же фазе, т. е. для напряжения фона осуществляется положительная обратная связь. Для того чтобы избежать увеличения фона, напряжение обратной связи обычно подают с дополнительной обмотки выходного трансформатора усилительного каскада.

Применение отрицательной обратной связи повышает стабильность коэффициента усиления каскада в $1 + \beta K$ раз. Коэффициент усиления в этом случае значительно меньше подвержен изменениям за счет колебаний питающих напря-

жений, старения ламп и деталей, входящих в каскад, а также изменения температуры и влажности окружающей среды.

Известны схемы осуществления отрицательной обратной связи в усилительных устройствах, не снижающие их коэффициента усиления. К ним относится предложенная Г. С. Цыкиным схема балансной обратной связи. В этой схеме,



Фиг. 7. Скелетная схема балансной обратной связи.

кроме делителей напряжения β и α, применен дополнительный усилитель K_β (фиг. 7). На сетку лампы первого усилительного каскада поступает напряжение

$$U_c = U_{вх} + K_\beta(\alpha U_{вх} - \beta U_{вых}),$$

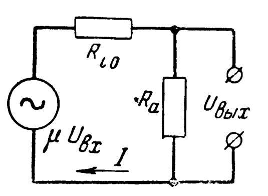
т. е. входное напряжение и в усиленном виде все компоненты напряжения, отсутствующие в приложенном к усилителю напряжении $U_{вх}$. Такой способ введения отрицательной обратной связи применяется в мощных усилительных устройствах.

СВОЙСТВА УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ, ОТЛИЧАЮЩИХСЯ СПОСОБОМ ВВЕДЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Рассмотрим свойства каскадов с параллельной и последовательной обратными связями. Пусть ко входу каскада с последовательной обратной связью по току (фиг. 2) „плюсом“ к сетке лампы приложен источник напряжения $U_{вх}$. Тогда на катодном сопротивлении $R_к$ появится напряжение $I_a \cdot R_к = U_o$, соответствующее напряжению $U_{вх}$. Если по каким-либо причинам за счет изменения напряжений источников питания анода или накала $U_{вых}$ увеличится, то

так как на сетку лампы воздействует разность напряжений $U_{вх} - I_a R_к$, потенциал сетки станет более отрицательным и анодный ток лампы уменьшится, что в свою очередь вызовет уменьшение U_o. Таким образом, в этой схеме автоматически происходит поддержание соответствия анодного тока входному напряжению, а при $U_{вх} = \text{const}$ — стабилизация анодного тока от изменений напряжения источников питания каскада.

Если по каким-либо причинам в схеме усилительного каскада с последовательной обратной связью по напряжению (фиг. 1) при неизменном напряжении $U_{вх}$ произойдет изменение напряжения $\beta U_{вых}$, то за счет воздействия на сетку разности напряжений $U_{вх} - \beta U_{вых}$ напряжение обратной связи $U_o = \beta U_{вых}$, как и в случае связи по току, будет стремиться стать равным $U_{вх}$.



Фиг. 8. Эквивалентная схема усилительного каскада с отрицательной обратной связью.

Исходя из этого, при отрицательной обратной связи по напряжению в каскаде автоматически происходит поддержание соответствия выходного напряжения входному. В случае же $U_{вх} = \text{const}$ осуществляется стабилизация выходного напряжения от изменения питающих напряжений. Таким образом, усилительные каскады с последовательной отрицательной обратной связью являются как бы своего рода автоматическими регуляторами.

Стабилизацию выходного тока в каскаде фиг. 2 и выходного напряжения в каскаде фиг. 1 можно объяснить тем, что в случае отрицательной обратной связи по току внутреннее сопротивление электронной лампы растет, а при отрицательной обратной связи по напряжению — падает. Каждый из этих усилительных каскадов можно представить в виде одной и той же эквивалентной схемы (фиг. 8). В случае применения глубокой отрицательной обратной связи по току R_{io} очень велико, и можно считать, что $R_{io} \gg R_a$. Тогда изменения сопротивления R_a практически не будут влиять на величину выходного тока I. Однако при этом будет сильно изменяться выходное напряжение $U_{вых}$. При глубокой отрицательной обратной связи по напряжению R_{io}, наоборот, очень мало, и можно считать, что $R_a \gg R_{io}$.

Тогда выходное напряжение каскада $U_{вых}$ почти не будет меняться при изменениях величины R_a (так как можно считать, что сопротивление R_a в этом случае как бы присоединено непосредственно к самому источнику напряжения $\mu U_{вх}$), а выходной ток I будет изменяться значительно.

В отношении компенсации различного вида искажений и помех, возникающих внутри усилительного устройства, схемы с последовательной обратной связью по току и напряжению действуют одинаково.

Количественно влияние отрицательной обратной связи по напряжению на уменьшение зависимости коэффициента усиления каскада от изменения сопротивления нагрузки $R_н$ можно определить, взяв отношение его выходных напряжений при наличии обратной связи при номинальной нагрузке ($U'_{вых}$) и отсутствии ее ($U_{вых}$), когда $R_н = \infty$.

Как известно, коэффициент усиления усилительного каскада с обратной связью

$$K_o = \frac{U'_{вых}}{U_{вх}} = \frac{K}{1 + K\beta}.$$

Отсюда

$$U'_{вых} = U_{вх} \frac{K}{1 + K\beta}.$$

Так как при отсутствии сопротивления нагрузки коэффициент усиления каскада K равен коэффициенту усиления лампы, то

$$U_{вых} = U_{вх} \frac{\mu}{1 + \mu\beta},$$

а отношение выходных напряжений

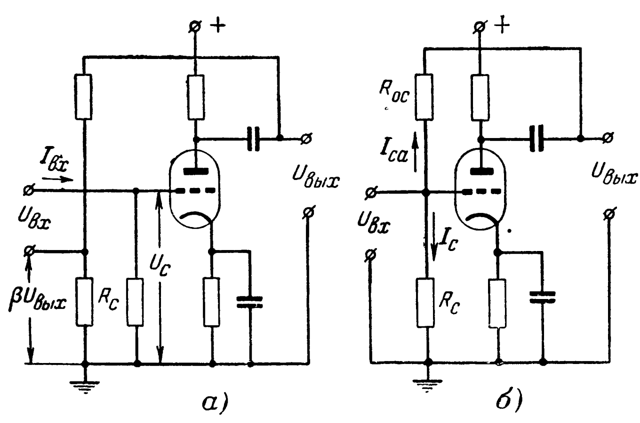
$$\frac{U'_{вых}}{U_{вых}} = \frac{K}{\mu} \frac{1 + K\beta}{1 + \mu\beta}.$$

Повышение напряжения на выходе усилителя за счет резкого увеличения сопротивления нагрузки в усилителях может в некоторых случаях (при использовании пентодов) привести к увеличению нелинейных искажений, а иногда вызвать повреждения в самих потребителях энергии, питающихся от усилителя. Например, при одновременном выключении большого числа громкоговорителей из трансляционной сети, подключенной к выходному каскаду усилителя, не охваченному отрицательной обратной связью по

напряжению, могут быть повреждены громкоговорители, оставшиеся включенными. Во избежание этого применяют отрицательную обратную связь. Задавшись допустимой величиной повышения напряжения при сбросе нагрузки, т. е. $\frac{U'_{вых}}{U_{вых}}$, легко найти необходимую величину коэффициента обратной связи β.

С помощью последовательной отрицательной обратной связи можно значительно увеличить входное сопротивление лампового каскада, что в ряде случаев весьма полезно.

Для того чтобы выяснить, каким образом последовательная и параллельная отрицательные обратные связи



Фиг. 9. Принципиальные схемы усилительных каскадов с отрицательной обратной связью по напряжению.
а — с последовательной обратной связью; *б* — с параллельной обратной связью.

влияют на входное сопротивление каскада, обратимся к фиг. 9, где изображены схемы усилительных каскадов с последовательной и параллельной отрицательными обратными связями по напряжению.

Ток входной цепи $I_{вх}$, протекающий через сопротивление R_c схемы с последовательной отрицательной обратной связью (фиг. 9,*а*), благодаря встречному включению напряжений $U_{вх}$ и $\beta U_{вых}$ значительно уменьшается; следовательно, входное сопротивление схемы $R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}}$ увеличивается. Это имеет особенно большое значение для высокочастотных каскадов, где последовательная отрицательная обратная

связь используется для уменьшения влияния емкости между сеткой и катодом лампы.

Ток $I_{вх}$, протекающий через сопротивление R_c в схеме с параллельной обратной связью (фиг. 9,*б*), слагается из тока I_{ca}, протекающего через сопротивление R_{oc}, и тока I_c, протекающего через сопротивление R_c, поэтому применение этого вида обратной связи приводит к уменьшению входного сопротивления лампового каскада.

Остановимся на некоторых свойствах параллельной отрицательной обратной связи. Применение такой связи не меняет усилительных свойств лампового каскада. При одинаковом напряжении на входе усилительный каскад с параллельной отрицательной обратной связью практически отдает такую же мощность и с теми же искажениями, как и при отсутствии обратной связи. Параллельная отрицательная обратная связь не уменьшает зависимости коэффициента усиления каскада от величины питающих напряжений. Напряжение отрицательной обратной связи при параллельном способе ее введения стремится не стать равным входному напряжению, а подавить его.

Здесь же, кстати, отметим, что входное сопротивление каскада с положительной параллельной обратной связью (в отличие от каскада с такой же отрицательной связью) увеличивается, а с последовательной—уменьшается. Поэтому для увеличения входного сопротивления каскада выгодно осуществлять положительную параллельную обратную связь.

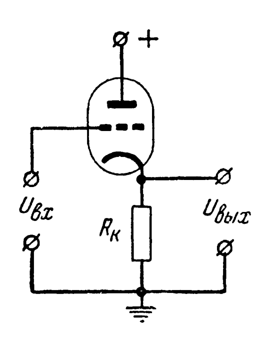
СХЕМЫ КАСКАДОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Познакомимся с простейшими, преимущественно однеламповыми схемами усилительных каскадов с отрицательной обратной связью по току и напряжению. Схема наиболее простого усилительного каскада с отрицательной обратной связью, называемого *катодным повторителем*, показана на фиг. 10. Такое название ему дано потому, что в каскаде с катодной нагрузкой, каким он является, переменное напряжение на выходе повторяет фазу входного напряжения.

Катодный повторитель обладает весьма полезными свойствами. В нем применена глубокая отрицательная обратная связь по напряжению. Поэтому выходное напряжение все целиком снова воздействует на его входную цепь. Таким

образом, на сетку лампы подается напряжение, равное $U_{вх} - U_{вых}$.

Вследствие того что коэффициент обратной связи в катодном повторителе равен единице (так как все выходное напряжение вновь поступает во входную цепь), коэффициент его усиления $K_o = \frac{K}{1+K}$. Он не только не усиливает, но даже ослабляет напряжение. При этом коэффициент его „усиления" исключительно стабилен. При K, большем 20, напряжение на выходе катодного повторителя практически равно напряжению на его входе. Следовательно, с помощью катодного повторителя можно получить новый



Фиг. 10. Схема простейшего каскада с отрицательной обратной связью (катодного повторителя).

Фиг. 11. Практическая схема катодного повторителя.

источник напряжения, подобный входному, но обладающий по сравнению с ним значительно большей мощностью, т. е. катодный повторитель является усилителем мощности. В качестве последнего он широко и используется.

К достоинствам катодного повторителя относятся: небольшая зависимость выходного напряжения от изменения сопротивления нагрузки, хорошие частотные свойства, малые нелинейные искажения и т. д.

Одна из практических схем катодных повторителей изображена на фиг. 11. В этой схеме сопротивление 1 *ком* и электролитический конденсатор емкостью 20 *мкф* образуют цепь автоматического смещения. Напряжение смещения через сопротивление 0,25 *мгом* подается на сетку лампы. Вход и выход катодного повторителя разделены конденсаторами по 0,1 *мкф*.

Коэффициент усилений катодного повторителя K через параметры его схемы можно вычислить по формуле

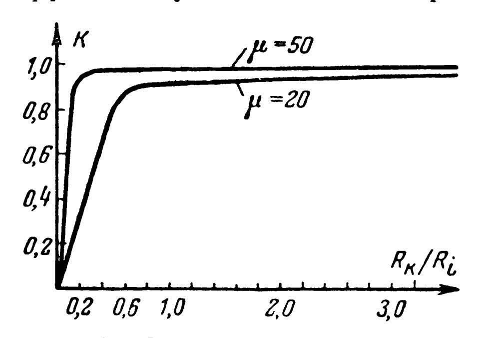
$$K = \frac{\mu \frac{R_к}{R_i}}{1 + \mu \frac{R_к}{R_i}},$$

где μ — коэффициент усиления лампы;

$R_к$ — сопротивление в цепи катода;

R_i — внутреннее сопротивление лампы.

На основе этой формулы построена зависимость K от отношения $\frac{R_к}{R_i}$ для двух значений μ (фиг. 12). Исходя из того, что коэффициент усиления каскада растет незначи-



Фиг. 12. Зависимость коэффициента усиления катодного повторителя от отношения $\frac{R_к}{R_i}$ для двух значений μ.

тельно при росте отношения $\frac{R_к}{R_i}$, это отношение при $\mu = 50$ не следует выбирать больше 0,3, а при $\mu = 20$ больше единицы. При значительно бо́льших $\frac{R_к}{R_i}$ приходится повышать напряжение анодного питания.

Режим работы лампы, работающей в катодном повторителе, по постоянному току не должен отличаться от режима работы лампы, рекомендованного для случая ее обычного включения.

Катодный повторитель может служить промежуточным звеном для согласования источника переменного напряжения с нагрузкой. При этом он как бы является устройством, трансформирующим сопротивление. От обычного трансформатора катодный повторитель отличается тем, что имеет очень хорошие частотную и фазовую характеристики и является усилителем мощности.

Сопротивление переменному току, измеренное на выходных зажимах катодного повторителя, не равно величине сопротивления $R_к$. Это объясняется тем, что ток за счет напряжения, приложенного к этим зажимам, создает падение напряжения на сопротивлении $R_к$. Последнее поступает на сетку лампы (считаем, что при этом входные зажимы катодного повторителя зашунтированы сопротивлением), которая является источником э. д. с., создающим дополнительный ток через сопротивление $R_к$. Следовательно, ток через сопротивление $R_к$, протекающий со стороны выходных зажимов, увеличивается, и потому сопротивление $R_{вых}$ между ними становится меньше $R_к$.

Таким образом, выходное сопротивление катодного повторителя зависит и от параметров используемой в нем лампы. Для определения его величины будем считать, что „плюс" анодного напряжения через конденсатор большой емкости присоединен к „земле". Тогда между выходными зажимами как бы включены два двухполюсника (сопротивление $R_к$ и лампа). Общая проводимость этой эквивалентной схемы

$$\frac{1}{R_{вых}} = S + \frac{1}{R_к},$$

где S—крутизна характеристики лампы.

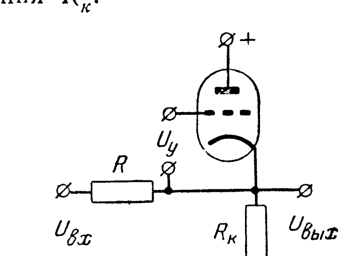
Отсюда легко получить выражение для выходного сопротивления катодного повторителя:

$$R_{вых} = \frac{R_к}{1 + SR_к}.$$

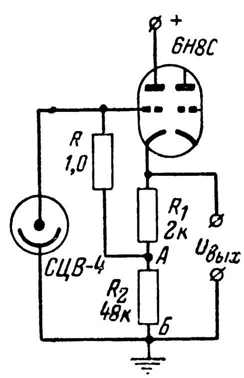
Эта зависимость используется для создания управляемых активных сопротивлений. На фиг. 13 показана распространенная схема управляемого делителя напряжения, содержащая сопротивление R и управляемое сопротивление в виде катодного повторителя. В качестве лампы здесь может быть использована, например, одна из половин двой-

ного триода 6Н9С, крутизна которой меняется при изменении управляющего напряжения $U_у$, приложенного к сетке.

Иногда применяется схема каскада с отрицательной обратной связью по напряжению, с помощью которой можно одновременно получать усиление сигналов (а не их ослабление) и иметь малое выходное сопротивление. Отличие этой схемы от только что рассмотренной состоит в том, что в ней входное напряжение прикладывается не к сетке лампы и „земле“, как обычно, а к сетке и части сопротивления $R_к$.



Фиг. 13. Схема управляемого делителя напряжения.



Фиг. 14. Схема усилительного каскада с малым выходным сопротивлением.

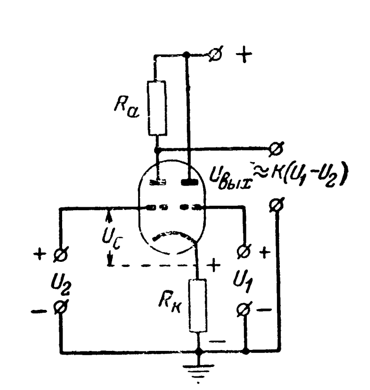
Рассмотрим работу такой схемы (фиг. 14) от фотоэлемента, получающего питание по постоянному току от точек *А* и *Б* сопротивления R_2. Напряжение, подаваемое на вход каскада, снимается здесь с сопротивления R.

Коэффициент усиления и выходное сопротивление такого каскада можно определить по следующим формулам:

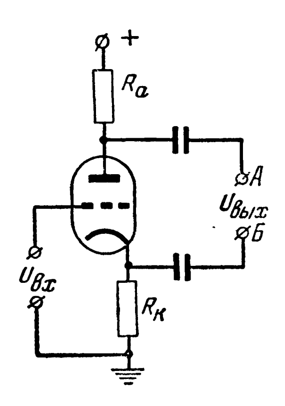
$$K = \frac{\mu}{\dfrac{\mu R_1 + R_i}{R_к} + 1}; \quad R_{вых} = \frac{R_i R_к}{\mu R_1 + R_к + R}.$$

При $R_1 = 2\,000$ *ом* и $R_2 = 48\,000$ *ом* $R_к = R_1 + R_2 = 50\,000$ *ом*. В случае использования в схеме половины двойного триода 6Н8С, у которого $\mu = 20$, а $R_i = 10\,000$ *ом*, коэффициент усиления каскада $K = 10$, а его выходное сопротивление $R_{вых} = 8\,300$ *ом*.

Применение катодного повторителя дает возможность получить разность напряжений двух источников тока, связанных между собой одним общим проводом, и усилить ее каскадом, „минус“ питающего напряжения которого соединен с этим же проводом. Это бывает необходимо, например, в стабилизаторах напряжения. Схема, предназначенная для этой цели, приведена на фиг. 15. За счет того что к сетке правой (по схеме) половины лампы катодного повторителя приложено напряжение U_1, падение напряжения на сопротивлении $R_к$ оказывается примерно равным U_1.



Фиг. 15. Схема для получения и усиления разности двух напряжений.



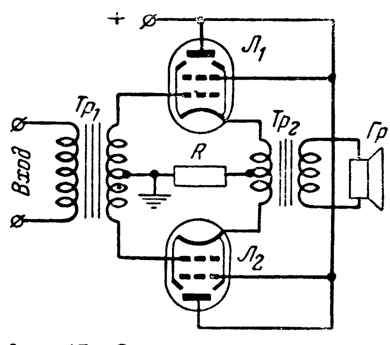
Фиг. 16. Схема для перехода с однотактного каскада на двухтактный.

К сетке левой половины лампы приложено напряжение $U_c = U_1 - U_2$. Усиленное каскадом напряжение U_c снимается с нагрузочного сопротивления R_a.

В усилителях низкой частоты катодные повторители были впервые применены в СССР в 1926 г. инж. П. Н. Куксенко. В то время они получили широкое распространение среди радиолюбителей. И в настоящее время они широко применяются в усилителях низкой частоты.

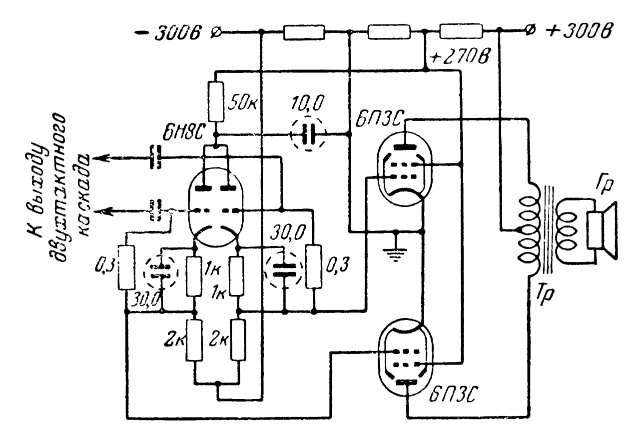
Весьма распространенной является схема усилительного каскада, содержащая два нагрузочных сопротивления: одно в катодной, а другое в анодной цепи лампы (фиг. 16). С ее помощью осуществляют переход с однотактного каскада на двухтактный без применения трансформатора, присоединяя сетки ламп двухтактного каскада к зажимам *А* и *Б*.

На фиг. 17 изображена схема катодного повторителя в оконечном двухтактном каскаде низкой частоты. В этой схеме может быть применен низкокачественный выходной трансформатор $Тр_2$ (непригодный для применения в обычной схеме из-за своей неудовлетворительной частотной характеристики), так как частотная характеристика всего усилителя будет исправлена благодаря глубокой отрицательной обратной связи. Вследствие того что подвижная катушка обычного громкоговорителя представляет собой колебательную систему с низкой частотой собственных колебаний и малым затуханием, громкоговоритель при звуках малой длительности воспроизводит эти звуки еще некоторое время после их окончания. В рассматриваемой схеме малое выходное сопротивление катодного повторителя приводит к увеличению затухания подвижной системы громкоговорителя и „затягивание" звуков отсутствует.



Фиг. 17. Схема катодного повторителя в оконечном двухтактном каскаде.

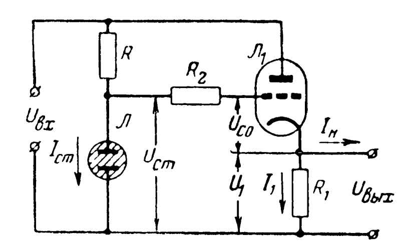
В схеме фиг. 18 катодный повторитель применен в качестве предоконечного каскада „раскачивающего" усили-



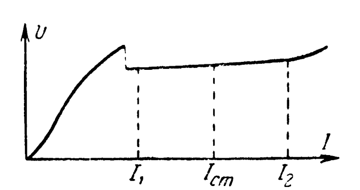
Фиг. 18. Схема, в которой катодный повторитель используется в качестве предоконечного каскада.

тель мощности, работающий с токами сетки. Указанная схема исключает необходимость применения междулампового трансформатора, который должен обладать малым сопротивлением и хорошей частотной характеристикой. Благодаря малому выходному сопротивлению катодных повторителей лампа 6Н8С может „раскачать" каскад усиления, отдающий до 50 *вт* неискаженной мощности.

Катодный повторитель широко используется в схемах электронных стабилизаторов напряжения. Пример такой схемы дан на фиг. 19. Она поддерживает постоянство выходного напряжения не только при изменении входного напряжения, но также и при изменении сопротивления



Фиг. 19. Катодный повторитель в схеме электронного стабилизатора напряжения.



Фиг. 20. Вольтамперная характеристика газового стабилизатора напряжения.

нагрузки. Кроме катодного повторителя, состоящего из лампы $Л_1$ и сопротивления R_1, схема содержит простейший стабилизатор напряжения, собранный на лампе *Л* и сопротивлении *R*.

Стабилизатор описываемого типа может найти широкое распространение в радиолюбительской практике, поэтому рассмотрим его подробнее.

Напомним принцип действия стабилизатора. Последний представляет собой последовательное соединение лампы *Л* газового стабилизатора и обычного активного сопротивления. Газовый стабилизатор является нелинейным электрическим сопротивлением. Его вольтамперная характеристика показана на фиг. 20. Рабочий участок этой характеристики ограничен токами I_1 и I_2. При значительном изменении тока $I_{ст}$ через газовый стабилизатор (в пределах между значениями тока I_1 и I_2) падение напряжения на нем меняется очень мало. Поэтому при изменении напряжения на входе стабилизатора ток через сопротивление *R* будет ме-

няться, но падение напряжения на газовом стабилизаторе может остаться практически неизменным.

Напряжение $U_{ст}$ будем считать неизменным; тогда при изменении по каким-либо причинам напряжения $U_{вых}$ напряжение на управляющей сетке лампы будет меняться таким образом, что происходящее при этом приращение ее анодного тока компенсирует изменение $U_{вых}$. Пусть, например, $U_{вых}$ уменьшится; тогда потенциал сетки лампы станет менее отрицательным, что вызовет увеличение анодного тока, а следовательно, и напряжения $U_{вых}$.

Величины сопротивлений R, R_1 и R_2, входящих в схему фиг. 19, выбираются следующим образом.

Падение напряжения на сопротивлении R

$$U = U_{вх} - U_{ст},$$

где $U_{ст}$ — рабочее напряжение газового стабилизатора.

Определив U_R и задавшись величиной тока $I_{ст}$ через газовый стабилизатор, находим R по формуле

$$R = \frac{U_R}{I_{ст}}.$$

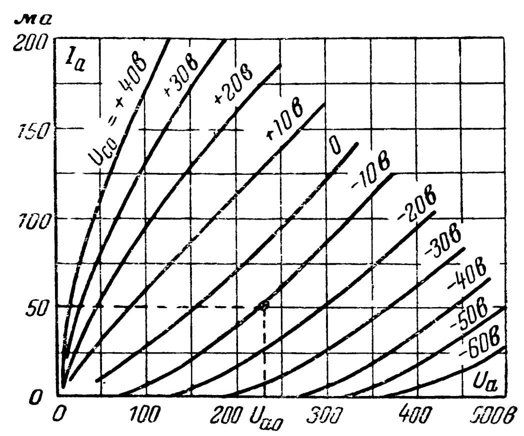
Сопротивление R_2 служит для того, чтобы в момент включения схемы, когда лампа $Л_1$ еще не разогрелась, уменьшить положительный потенциал сетки. Это сопротивление обычно выбирают в пределах $3 \div 10$ *ком*.

В установившемся режиме падение напряжения на сопротивлении R_1 окажется больше, чем напряжение, снимаемое с газового стабилизатора, и потенциал сетки лампы станет отрицательным. Для того чтобы определить величину сопротивления R_1, нужно знать ток нагрузки $I_н$ и иметь семейство анодных характеристик лампы $Л_1$.

Пусть в схеме использован газовый стабилизатор типа СГ4С и применена лампа типа 6Ф6С, характеристики которой приведены на фиг. 21. Тогда, выбрав такой режим работы лампы, при котором рабочая точка на ее характеристике соответствует значениям $I_{a0} = 50$ *ма*, $U_{a0} = 230$ *в* и $U_{c0} = -10$ *в*, а также задавшись током нагрузки $I_н = 30$ *ма*, подсчитаем величину сопротивления R_1. Для этого сначала определим ток I_1 и напряжение U_1;

$$I_1 = I_{a0} - I_н = 50 - 30 = 20 \text{ ма} = 20 \cdot 10^{-3} a,$$

Рабочее напряжение $U_{ст}$ выбранного типа газового стабилизатора равно 150 *в*, а его рабочий ток $I_{ст} = 10 \cdot 10^{-3}$ *а*. Учитывая, что в установившемся режиме сеточный ток



Фиг. 21. Семейство анодных характеристик лампы 6Ф6С.

отсутствует и, следовательно, падение напряжения на сопротивление R_2 равно нулю, найдем напряжение U_1 на сопротивлении R_1:

$$U_1 = U_{ст} - U_{c0} = 150 - (-10) = 160 \text{ в}.$$

Затем находим сопротивление

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{160}{20 \cdot 10^{-3}} = 8\,000 \text{ ом}.$$

Задавшись $U_{вх} = 300$ *в*, определяем сопротивление

$$R = \frac{U_{вх} - U_{ст}}{I_{ст}} = \frac{300 - 150}{10 \cdot 10^{-3}} = 15\,000 \text{ ом}.$$

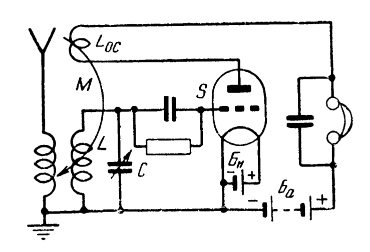
КАСКАД С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

ПОВЫШЕНИЕ УСИЛЕНИЯ КАСКАДА

Регенеративный приемник. С помощью положительной обратной связи можно повысить коэффициент усиления каскада. Как уже указывалось, при введении положительной обратной связи коэффициент усиления каскада возрастает в $\frac{1}{1 - K\beta}$ раз.

Одним из первых применений положительной обратной связи было ее использование в усилителях высокой частоты радиоприемных устройств. Усиление колебаний высокой частоты при помощи положительной обратной связи обычно называют *регенерацией*, а ламповые каскады усиления высокой частоты, в которых она применяется, — *регенераторами*. Впервые регенераторы были применены в радиоприемниках.

Схема простейшего регенеративного приемника представлена на фиг. 22. В ней осуществляется сеточное детектирование, вследствие чего анодный ток лампы содержит одновременно составляющие высокой и низкой частот, а также составляющую постоянного тока. Составляющая высокой частоты создает в катушке обратной связи L_{oc} переменное магнитное поле, пронизывающее катушку индуктивности контура L и индуктирующее в ней напряжение. Последнее совпадает по фазе с напряжением, поступающим из антенной цепи. Обратная связь здесь выбирается такой глубины, при которой еще нет самовозбуждения. Если ее выбрать большей, чем это требуется, то радиоприемник превратится в радиопередатчик и сам будет излучать энергию, создавая помехи другим приемникам. Иногда применяют радиоприемники, в которых регенеративному каскаду предшествует усилитель высокой частоты, вследствие чего затрудняется проникновение в антенну колебаний, возникших в этом каскаде.



Фиг. 22. Схема простейшего регенеративного приемника.

В контур LC за счет положительной обратной связи из анодной цепи лампы вносится комплексное сопротивление ΔZ, имеющее активную и реактивную составляющие ΔR и ΔX. Эти составляющие зависят как от параметров схемы, так и от крутизны S и внутреннего сопротивления R_i лампы.

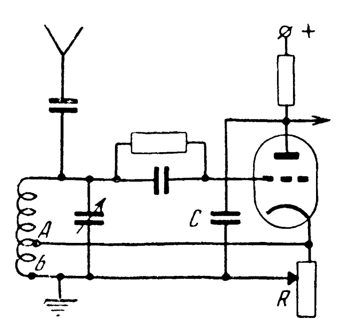
Активное сопротивление, вносимое в колебательный контур, является отрицательным. Его величина зависит от коэффициента взаимоиндукции M между катушками L и L_{oc}, который изменяется при настройке приемника. Чем больше M, тем больше и ΔR. Величина ΔR тем больше, чем больше S, и тем меньше, чем больше емкость контура C,

Когда ΔR становится равным активному сопротивлению r контура, потери в контуре компенсируются вносимым в него отрицательным сопротивлением, и схема начинает генерировать колебания. Таким образом, существует критическое значение коэффициента взаимоиндукции $M_{кр}$, при котором регенератор находится на пороге генерации. Оно определяется следующим выражением:

$$M_{кр} = \frac{RC}{S}.$$

При изменении питающих схему напряжений меняются параметры электронной лампы S, R_i и μ. Так как S входит в формулу для $M_{кр}$, то при изменении этих напряжений могут быть случаи, когда схема самовозбудится. Таким образом, одним из серьезных недостатков регенеративных радиоприемников является неустойчивость их работы.

Так как за счет положительной обратной связи уменьшается активное сопротивление контура, то его резонансная кривая становится более острой. В этом случае частотная характеристика усилителя высокой частоты при работе вблизи резонанса становится более неравномерной и при радиотелефонном приеме появляются частотные искажения. Таким образом, с помощью регенератора можно получить либо высокую избирательность при больших частотных искажениях, либо низкую избирательность при малых частотных искажениях.



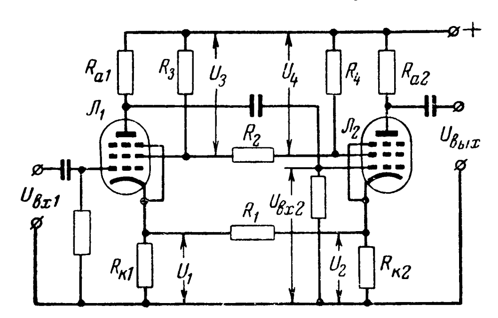
Фиг. 23. Схема регенеративного каскада с плавной регулировкой обратной связи при помощи переменного сопротивления.

Существуют способы плавного введения положительной обратной связи в схему регенеративного приемника, при которых расстройка колебательного контура отсутствует. Простейшая схема, удовлетворяющая этим требованиям, приведена на фиг. 23. Положительная обратная связь в ней осуществляется за счет того, что часть контурной катушки индуктивности, заключенная между точками A и $Б$, через конденсатор C подсоединена к аноду и катоду лампы. Благодаря этому в катушку, а следовательно, и в сеточную цепь лампы из анодной цепи поступает энергия. Ре-

гулировка обратной связи в этой схеме осуществляется с помощью переменного сопротивления R.

Налаживается схема просто. Для этого точку *Б* на контурной катушке нужно перемещать при максимальной величине сопротивления R до тех пор, пока не появится генерация. После этого следует уменьшить величину R, с тем чтобы „сорвать" генерацию. Эта схема с успехом применяется радиолюбителями-коротковолновиками. Усиление, получаемое за счет положительной обратной связи, при малых сигналах достигает очень большой величины, порядка нескольких тысяч.

Применение положительных обратных связей в усилителе низкой частоты. Положительную обратную связь в усилительных устройствах используют часто в сочетании



Фиг. 24. Схема усилителя с положительной обратной связью.

с отрицательной обратной связью. Таким путем, например, удается упростить конструкцию усилительных устройств за счет исключения из их схем электролитических или иных конденсаторов большой емкости, предназначенных для устранения нежелательных отрицательных обратных связей. Для того чтобы при этом не снизить усиления, дополнительно вводятся положительные обратные связи.

Схема, в которой отсутствуют электролитические конденсаторы и применены сопротивления, образующие цепь положительной обратной связи, изображена на фиг. 24. В ней цепи положительной обратной связи создаются с помощью сопротивлений R_1 и R_2. Подобные усилители имеют малые габариты, особенно при изготовлении их методом печатных схем.

Поясним кратко, как осуществляются в этой схеме положительные обратные связи. Напряжение U_1 на сопро-

тивлении $R_{\kappa 1}$ находится в фазе с входным напряжением $U_{вх1}$ усилителя. Напряжение $U_{вх2}$ на входе следующего каскада находится в противофазе с напряжением $U_{вх1}$, потому что оно снимается с нагрузочного сопротивления R_{a1} анодной цепи первой лампы $Л_1$. Так как напряжение U_2 на сопротивлении $R_{\kappa 2}$ находится в фазе с входным напряжением $U_{вх2}$ последнего каскада, то U_1 и U_2 находятся в противофазе. За счет напряжения U_2 ток через сопротивление $R_{\kappa 1}$ — увеличивается и большее напряжение поступает на управляющую сетку лампы $Л_1$, т. е. осуществляется положительная обратная связь. Следует отметить, что при соединении через сопротивление катодов ламп двух четных или нечетных каскадов устройства будет осуществлена не положительная, а отрицательная обратная связь.

Если конденсаторы в цепях экранных сеток ламп отсутствуют и нет сопротивления R_2, то на сопротивлениях R_3 и R_4 будут усиленные переменные напряжения. Напряжения на экранных сетках, точно так же как и напряжения на анодах, будут в противофазе с напряжениями, подаваемыми на управляющие сетки ламп. Таким образом, на электронные потоки в каждой из ламп действуют два напряжения, находящихся в противофазе, т. е. осуществляется отрицательная обратная связь. Если в схеме включено сопротивление R_2, то так как напряжение U_3 и U_4 находятся в противофазе, ток через сопротивление R_3 возрастет и напряжение U_3 увеличится, вызывая уменьшение переменного напряжения на экранной сетке лампы $Л_1$. Следовательно, при включении сопротивления R_2 в схеме действует дополнительная положительная обратная связь.

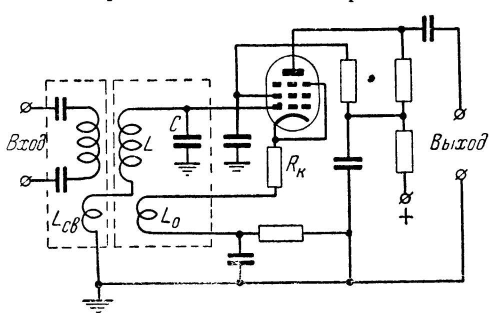
Сопротивления R_1 и R_2 для нормальной работы схемы должны быть выбраны такими, чтобы только незначительная часть напряжений, имеющихся на катоде и экранной сетке лампы $Л_2$, подавалась на управляющую и экранную сетки лампы $Л_1$. В противном случае схема может стать генератором электрических колебаний. Исходя из этого, обычно выбирают $R_1 = (3 \div 10) R_{\kappa 1}$ и $R_2 = (2 \div 5) R_3$.

ПОВЫШЕНИЕ ДОБРОТНОСТИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ КОНТУРОВ

Положительную обратную связь в сочетании с отрицательной можно использовать для повышения добротности колебательных контуров, включенных в сеточную цепь лампы

резонансного усилительного каскада (фиг. 25). С этой целью контур, состоящий из L и C, связывают с дополнительной катушкой L_o, осуществляющей положительную обратную связь. Отрицательная обратная связь создается путем включения в катодную цепь лампы сопротивления $R_к$. Входное напряжение поступает на вход усилителя через катушку $L_{св}$.

Параметры схемы выбраны так, чтобы на резонансной частоте колебательного контура отрицательная обратная связь полностью компенсировалась положительной. На других же частотах при неизменной отрицательной обратной



Фиг. 25. Схема резонансного усилителя, в которой положительная и отрицательная обратные связи используются для повышения добротности колебательного контура и стабильности каскада.

связи положительная связь уменьшается с удалением от резонансной частоты. Уменьшение происходит благодаря тому, что на этих частотах сопротивление контура резко уменьшается и он вносит в катушку L_0 большое активное сопротивление.

С помощью приведенной схемы возрастание добротности Q контура при оптимальном выборе параметров определяется следующим выражением:

$$Q_o = Q(1 + SR_к),$$

где Q_0 и Q — добротности контуров при наличии и отсутствии положительной обратной связи.

В этой схеме удается повысить добротность контура до значения $Q_0 = 1\,000$. Вследствие примененной отрицательной обратной связи, схема устойчиво работает и не самовозбуждается при изменениях параметров или смене ламп.

ГЕНЕРАТОРЫ СИНУСОИДАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

В генераторе синусоидальных колебаний обязательно наличие индуктивного и емкостного сопротивлений. В колебательном контуре такого генератора энергия поочередно запасается то в конденсаторе, то в катушке индуктивности. В этих элементах контура происходят потери энергии, и если их не восполнять, то колебания в контуре получаются затухающими. Таким образом, для создания незатухающих колебаний недостаточно только колебательного контура, необходимо еще и „отрицательное" сопротивление, непрерывно пополняющее израсходованную в контуре энергию.

Частота колебаний определяется параметрами колебательного контура, исходя из того, что при наличии колебаний „резервуары энергии" должны быть одинаковы, т. е. реактивные сопротивления катушки L и конденсатора C должны быть равны между собой, т. е. $\omega L = \frac{1}{\omega C}$. Тогда $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Согласно же известному соотношению между частотой f и угловой частотой $\omega = 2\pi f$ частота колебаний

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Генераторы синусоидальных колебаний, однако, могут содержать в своей схеме только конденсаторы и сопротивления или только катушки индуктивности и сопротивления. Недостающим реактивным элементом в таких генераторах служит лампа с цепью реактивной обратной связи, содержащей также только сопротивление и емкость или только сопротивление и индуктивность.

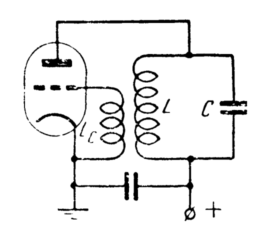
Необходимо отметить также, что генераторы могут быть построены и без наличия в их схеме реактивных сопротивлений в виде отдельных конструктивных узлов. Реактивными сопротивлениями в этих генераторах могут быть, например, междуэлектродные емкости ламп, индуктивности выводов их электродов, индуктивности проводов и емкости между монтажными проводами.

Схема простейшего лампового генератора, содержащего колебательный контур, трехэлектродную лампу и цепь обратной связи, показана на фиг. 26.

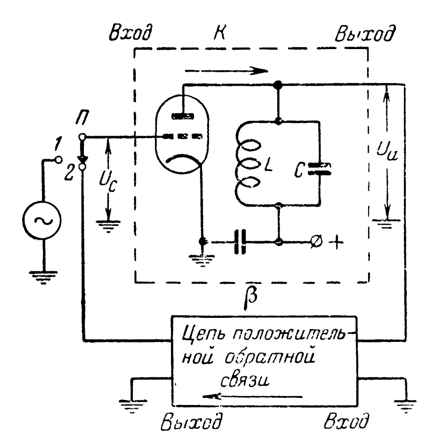
Возникновение колебаний в этой схеме можно представить себе следующим образом. Пусть в колебательном

контуре LC за счет какого-либо изменения тока, протекающего через катушку L, например за счет замыкания анодной цепи, возникли собственные колебания. В результате этого в катушке L_c индуктируется напряжение, изменяющее анодный ток лампы, проходящий через контур и усиливающий в нем колебания. Амплитуда колебаний вследствие этого возрастает до тех пор, пока колебания анодного тока не достигнут загиба характеристики лампы. Тогда нарастание колебаний в контуре прекращается и устанавливается стационарная их амплитуда. Таким образом, поддержание незатухающих колебаний в этом генераторе осуществляется с помощью положительной обратной связи и лампы.

Энергия, расходуемая на потери в колебательном контуре, непрерывно восполняется за счет анодного источника тока. Следовательно, генератор является преобразователем энергии постоянного тока анодного источника питания в энергию переменного тока.



Фиг. 26. Схема простейшего лампового генератора.



Фиг. 27. Представление генератора в виде усилительного каскада с положительной обратной связью.

Генератор представляет собой усилительный каскад (фиг. 27), обладающий коэффициентом усиления $K = \frac{U_a}{U_c}$ и имеющий положительную обратную связь, посредством которой в сеточную цепь поступает напряжение $U_c = \beta U_a$. Как усилительный каскад, так и цепь обратной связи передают напряжение с входных зажимов на выходные, поворачивая его по фазе на 180°.

Если на сетку усилительной лампы напряжение подавать от внешнего источника переменного тока, т. е. пере-

ключатель $П$ в схеме фиг. 27 установить в положении 1, то при напряжении на сетке U_c на контуре будет действовать напряжение U_a. Параметры цепи положительной обратной связи можно выбрать таким образом, чтобы $\frac{1}{\beta}=K$. Тогда при мгновенном переводе переключателя $П$ в положение 2 на сетке лампы окажется то же напряжение, какое было на ней при работе усилительного каскада от внешнего источника. Схема в этом случае будет работать как генератор с самовозбуждением.

Если мгновенный перевод переключателя $П$ из положения 1 в положение 2 осуществляется при $\frac{1}{\beta}<K$, то колебания в контуре постепенно исчезают. В случае же $\frac{1}{\beta}>K$ они нарастают. Для того чтобы узнать, до какой величины происходит в этом случае нарастание колебаний, выясним, чем определяется амплитуда генерируемых колебаний.

Выходное напряжение U_a генератора определяется двумя выражениями. С одной стороны,

$$U_a=KU_c,$$

а с другой,

$$U_a=\frac{1}{\beta}U_c.$$

Коэффициент усиления каскада K зависит от параметров лампы, величина которых определяется местоположением рабочей точки на характеристике лампы. Кроме того, K зависит также от амплитуды напряжения U_c переменного тока, что проявляется при больших U_c.

Последнюю зависимость можно проследить, раскрыв известное выражение $K=\frac{\mu Z_{экв}}{R_i+Z_{экв}}$, где $Z_{экв}$ — эквивалентное сопротивление колебательного контура, как известно, $R_i=\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$. Так как анодная характеристика лампы нелинейна, то величина R_i в ее разных точках различна. При больших напряжениях U_c, вызывающих большие напряжения переменного тока U_a, приходится говорить о каком-то среднем, приведенном значении R_i. Выразим это значение через R_i' и подставим его вместо R_i в выражение для K. Тогда $K=\frac{\mu Z_{экв}}{R_i'+Z_{экв}}$. Отсюда следует, что K зависит от U_c.

При нарастании колебаний благодаря выбору $\frac{1}{\beta} > K$ коэффициент усиления K будет постепенно увеличиваться, и когда он станет равен $\frac{1}{\beta}$, нарастание колебаний прекратится и они станут устойчивыми.

Если же коэффициент положительной обратной связи β выбрать таким, при котором $\frac{1}{\beta} = K$, то устойчивые автоколебания в схеме не смогут существовать, так как при возникновении колебаний в этом случае нарастание U_c до определенной величины вызовет уменьшение K и колебания сорвутся.

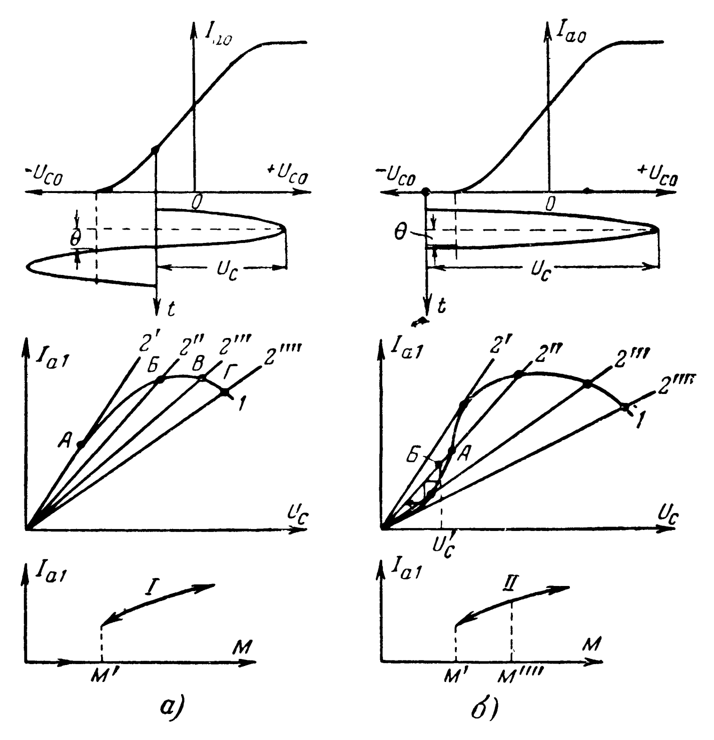
Процесс возникновения колебаний в контуре лампового генератора определяется выбором рабочей точки на характеристике лампы. В зависимости от этого различают *мягкий* и *жесткий* режимы самовозбуждения, с которыми мы кратко ознакомимся.

Характер режима самовозбуждения, т. е. процесса нарастания колебаний в контуре, зависит от вида зависимости $U_a = KU_c$. Обычно при определении режима самовозбуждения пользуются не непосредственно этой зависимостью, а так называемой колебательной характеристикой. Под последней понимается зависимость величины первой гармоники анодного тока I_{a1} от величины напряжения U_c.

Вид колебательной характеристики определяется выбором рабочей точки на характеристике лампы. На фиг. 28 представлены колебательные характеристики различных типов и показаны соответствующие им рабочие точки на анодно-сеточных характеристиках лампы.

В том случае, когда рабочая точка выбрана так, что она соответствует анодному току $I_a > 0$, угол отсечки анодного тока θ, под которым понимается половина времени прохождения переменного тока через лампу за период, больше 90°. При этом колебательная характеристика *1* имеет вид кривой, выгнутой вверх (фиг. 28,*а*). Если же рабочая точка выбрана так, что она соответствует $I_a = 0$, т. е. угол отсечки меньше 90°, то колебательная характеристика при малых U_c выгнута вниз, а при больших U_c — вверх (фиг. 28,*б*). Такие зависимости вида колебательных характеристик от угла отсечки θ объясняются тем, что при изменении U_c меняются форма импульса анодного тока и процентное содержание в нем его первой гармоники.

Амплитуда генерируемых колебаний определяется зависимостями $K=\frac{U_a}{U_c}$ и $U_c=\beta U_a$. Они соответствуют колебательным характеристикам *1* и прямым обратной связи *2'*, *2''*, *2'''* и т. д. Точка пересечения колебательной характеристики с прямой обратной связи определяет величину первой гармоники анодного тока, а следовательно, и выходное напряжение генератора.



Фиг. 28. Получение характеристик самовозбуждения.
а — для мягкого режима; *б* — для жесткого режима.

Режим самовозбуждения характеризуется зависимостью первой гармоники анодного тока от величины коэффициента обратной связи β. В схеме же фиг. 26 коэффициент β зависит от коэффициента взаимоиндукции M, поэтому под колебательными характеристиками фиг. 28 приведены соответствующие им кривые, характеризующие мягкий и жесткий режимы самовозбуждения.

В случае мягкого режима (фиг. 28,*а*) при коэффициенте взаимоиндукции M', соответствующем прямой обратной связи $2'$ и точке *А* пересечения ее с колебательной характеристикой *1*, колебания возникнут. При дальнейшем увеличении *М* получим прямые обратной связи $2''$, $2'''$, $2''''$ и соответствующие им точки *Б*, *В* и *Г* пересечения с колебательной характеристикой. Таким образом, анодный ток первой гармоники I_{a1} в функции от *М* определяется здесь кривой *I*.

В случае жесткого режима (фиг. 28,*б*) колебания возможны только тогда, когда тангенс угла наклона прямой обратной связи будет больше тангенса угла наклона колебательной характеристики в точке ее пересечения. Точка пересечения *А* и все точки пересечений, лежащие ниже нее, являются точками неустойчивого режима, так как если по каким-либо причинам величина первой гармоники анодного тока I_{a1} изменится, то колебания сразу же сорвутся. Пусть, например, I_{a1} уменьшится до значения, соответствующего точке *Б* и напряжению U_c'. При этом согласно колебательной характеристике ток I_{a1} снова уменьшится; следовательно, уменьшится U_c, что вызовет дальнейшее уменьшение I_{a1} и т. д. и, наконец, колебания сорвутся. Равновесие в точке *А* подобно неустойчивому равновесию конуса, стоящего на своем острие. Колебания в случае жесткого самовозбуждения поэтому могут начаться только при M'''', соответствующем прямой обратной связи $2''''$. Если затем уменьшить *М*, то они сорвутся при M', соответствующем прямой обратной связи $2'$.

В случае мягкого самовозбуждения при определенной величине обратной связи происходит самовозбуждение и при той же ее величине колебания срываются. При жестком самовозбуждении могут иметь место случаи, когда при достаточно большой глубине обратной связи колебания не возникают, а получаются они только при наличии внешнего толчка, например после выключения и повторного резкого включения анодного напряжения.

Обычно в схемах ламповых генераторов напряжение смещения на сетку лампы создается автоматически за счет сеточного тока. Это достигается включением последовательно с сеточной катушкой L_c конденсатора, зашунтированного сопротивлением. В некоторых случаях это сопротивление включается между сеткой и катодом лампы. При

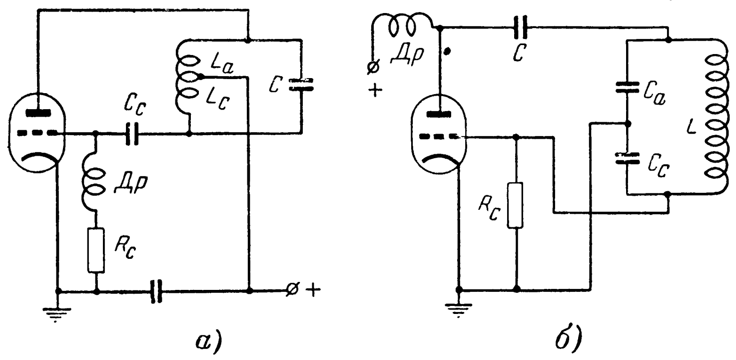
наличии указанной цепи автоматического смещения осуществляется мягкое самовозбуждение и увеличивается устойчивость амплитуды колебаний генератора. Это объясняется тем, что в этом случае автоматически изменяется угол отсечки анодного тока. В момент возникновения колебаний вследствие отсутствия сеточного тока, а следовательно, и напряжения смещения он больше 90°, поэтому в схеме обеспечивается мягкое самозозбуждение. Далее, с ростом колебаний за счет непрерывного увеличения напряжения смещения угол отсечки уменьшается и к моменту их установления становится меньше 90°. Вследствие этого автоматическое смещение за счет сеточного тока в ламповых генераторах с самовозбуждением применяется очень часто.

Положительная обратная связь в ламповом генераторе может быть осуществлена путем применения трансформатора (как это сделано в схеме фиг. 26), поворачивающего фазу напряжения на 180°. Поворот напряжения по фазе можно осуществить и без трансформатора, с помощью емкостного или индуктивного делителя напряжения. Такие делители присоединяются соответственно к катушке индуктивности или к конденсатору и образуют с ними колебательный контур. Лампа с целью обеспечения положительной обратной связи подключается к делителю напряжения следующим образом: к одному его концу присоединяется сетка, к среднему выводу — катод и к другому концу — анод лампы. Так как контур присоединяется в таких схемах с помощью трех концов, то их называют *трехточечными*.

Две трехточечные схемы ламповых генераторов показаны на фиг. 29. В одной из них (фиг. 29,*а*) напряжения на сетку и анод снимаются с индуктивности контура $L = L_a + L_c$, а в другой (фиг. 29,*б*) — с емкости контура $C = \frac{C_a \cdot C_c}{C_a + C_c}$. В каждой из этих схем применено автоматическое смещение за счет сеточного тока. Элементами цепи автоматического смещения являются сопротивления R_c и конденсаторы C_c. В схеме фиг. 29,*а* в цепи смещения предусмотрен дроссель *Др*, необходимый для того, чтобы уменьшить шунтирование части контурной катушки активным сопротивлением R_c, а тем самым уменьшить и потери в контуре. Напряжение смещения постоянного тока в обеих схемах создается за счет выпрямления на участке сетка —

катод лампы переменного напряжения, снимаемого с L_c или с C_c.

В схеме с индуктивной связью (фиг. 29,*а*) применено последовательное питание анодной цепи. В ней элементы колебательного контура находятся под высоким напряжением постоянного тока. В схеме с емкостной связью (фиг. 29,*б*) используется параллельное питание анодной цепи, поэтому контур находится только под напряжением переменного тока. Элементы *Др* и *С* в этой схеме необходимы для того, чтобы уменьшить величину переменного тока через источник анодного напряжения и исключить возможность прохождения постоянного тока через катушку *L*.



Фиг. 29. Трехточечные схемы генераторов.

При их отсутствии в схеме произошли бы короткие замыкания (по току высокой частоты — через источник анодного питания и по постоянному току — через катушку *L*).

Поворот напряжения по фазе на 180° в ламповых генераторах иногда производят цепью, содержащей реактивности обоих знаков. Тогда, например, параллельно колебательному контуру, состоящему из конденсатора и катушки индуктивности, присоединяют последовательно соединенные конденсатор и катушку индуктивности, образующие ветвь положительной обратной связи. Напряжение на сетку лампы при этом снимается с индуктивности. Конденсатором ветви обратной связи в случае генерирования колебаний в коротковолновом диапазоне в таких схемах служит междуэлектродная емкость лампы (емкость анод — сетка). В этом случае полезно используется естественная обратная связь. Катушку индуктивности, с которой снимается напряжение обратной связи, обычно шунтируют конденсатором, и тогда

генератор имеет два колебательных контура. Чем больше добротность колебательного контура генератора подобного типа, тем выше стабильность его частоты при изменениях всех параметров схемы, кроме контура.

Так как делитель напряжения, осуществляющий в ламповых генераторах обратную связь, в ряде схем производит сдвиг по фазе не точно на 180°, то лампа в этих случаях вносит в колебательный контур генератора не только активное отрицательное, но также и реактивное сопротивление. Вследствие этого генерируемая частота несколько отличается от частоты собственных колебаний контура. Реактивная обратная связь в большинстве схем ламповых генераторов, конечно, значительно меньше активной.

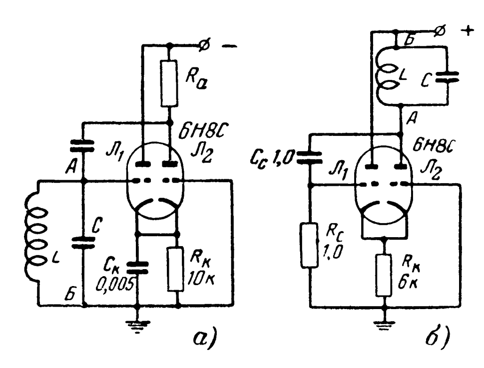
В последнее время широкое распространение получили ламповые генераторы, использующие отрицательное сопротивление как отдельный элемент схемы. Они стабильны в работе, просты в настройке и строятся с контурами, имеющими всего два выходных зажима. Стабильность работы таких генераторов во многих случаях объясняется одновременным использованием положительной и отрицательной обратных связей.

К числу генераторов подобного типа относятся схемы генераторов с катодной связью, приведенные на фиг 30. Они представляют собой два взаимосвязанных усилительных ламповых каскада. Выходное напряжение первого из них поступает на вход второго, а выходное напряжение второго— на вход первого. За счет этого осуществляется положительная обратная связь, и в контур, находящийся в одном из каскадов, вносится тем самым отрицательное сопротивление. В этих ламповых каскадах, кроме того, применяется и отрицательная обратная связь.

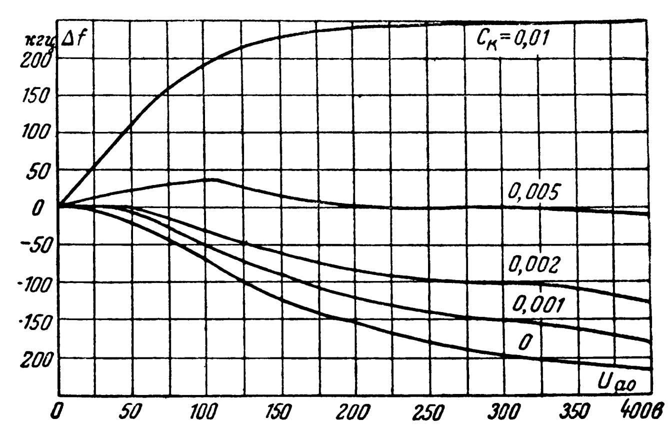
Схема фиг. 30,*а*, содержащая катодный повторитель на триоде $Л_1$ и усилительный каскад на триоде $Л_2$, сетка которого заземлена, представляет собой в точках *АБ* отрицательное сопротивление. Оно присоединено параллельно контуру. Это отрицательное сопротивление создается за счет того, что на сетку триода $Л_1$ поступает в той же фазе напряжение, усиленное триодом $Л_2$.

В генераторе фиг. 30,*б* отрицательным сопротивлением служит участок *АВ*, к которому подключен колебательный контур *LC*. Параметры цепи, содержащей сопротивление R_c и конденсатор C_c, выбираются такими, чтобы соблюдалось неравенство $\frac{1}{\omega C_c} \ll R_c$, при котором эта цепь практически

не будет осуществлять сдвига фазы. С помощью сопротивления $R_к$ подбирается величина положительной обратной связи, потребной для возникновения колебаний.



Фиг. 30. Схемы генераторов с катодной связью.



Фиг. 31. Зависимость ухода частоты генератора (см. фиг. 30,*а*) от изменения анодного напряжения при различных емкостях $C_к$.

Подбором емкости $C_к$ в схеме фиг. 30,*а* можно значительно уменьшить зависимость частоты генерируемых колебаний от напряжения U_{a0} анодного источника питания. Для иллюстрации этого на фиг. 31 приведены графики изменения частоты Δf при изменении напряжения U_{a0}, снятые при различных значениях емкости $C_к$.

Генераторы с катодной связью находят применение как на низких, так и на высоких частотах.

СПУСКОВЫЕ СХЕМЫ И ГЕНЕРАТОРЫ РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Спусковые схемы. Ламповые каскады с положительной обратной связью можно поставить в релейный режим. Каскады, работающие в таком режиме, носят название *спусковых схем* или *релейных усилителей постоянного тока*. Они имеют пусковую характеристику, подобную характеристике электромагнитного реле.

При каком-то напряжении срабатывания спусковая схема, как и электромагнитное реле, замыкает электрическую цепь. В дальнейшем при нарастании напряжения ток в этой цепи не меняет своей величины, а при уменьшении напряжения скачком уменьшается до нуля не при напряжении срабатывания, а при меньшем напряжении (напряжении отпускания).

Спускозая схема по сравнению с обычным электромагнитным реле, обладает рядом достоинств. Основными из них являются ничтожно малое время срабатывания (порядка микросекунд) и ничтожно малая мощность входного сигнала (порядка сотых долей микроватта). Спусковые схемы могут быть использованы и в качестве минимальных или максимальных реле. Они широко применяются в различных отраслях техники.

Поясним принцип действия спусковой схемы. Для этого рассмотрим ее эквивалентную схему, показанную на фиг. 32,*а*. Она представляет собой последовательное соединение линейного и нелинейного сопротивлений. Вольт-амперная характеристика нелинейного сопротивления N показана на фиг. 32,*б*. В области *II* оно представляет собой отрицательное сопротивление.

Практически в электронных спусковых схемах наиболее целесообразным является получение отрицательного сопротивления за счет положительной обратной связи. Такие отрицательные сопротивления наиболее устойчивы.

Для эквивалентной схемы фиг. 32,*а* действительно следующее соотношение:

$$U = U_R + U_N = IR + U_N,$$

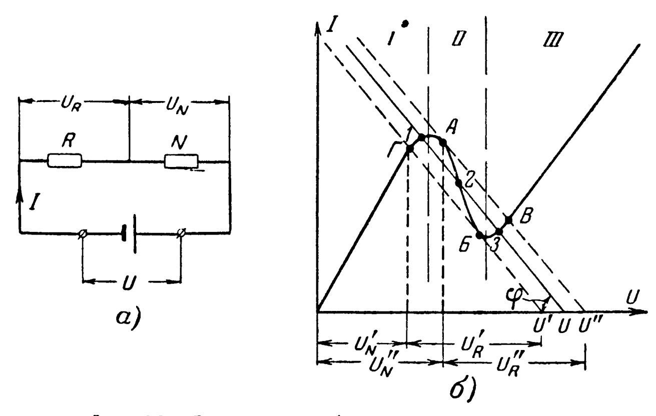
где I — ток в цепи, а U_R и U_N — падения напряжений на линейном и нелинейном сопротивлениях.

Отсюда находим ток:

$$I=\frac{U}{R}-\frac{U_N}{R}.$$

Решим это уравнение графическим путем так, как обычно строят динамическую характеристику лампы, соединенной последовательно с сопротивлением. Для этого под углом $\varphi=\operatorname{arc}\operatorname{ctg} R$ проведем прямую нагрузки и пометим точки ее пересечения с вольтамперной характеристикой нелинейного сопротивления.

Как это следует из построения, при напряжениях батареи U, лежащих в диапазоне $U'-U''$, прямая нагрузки пересекает вольтамперную характеристику сопротивления N



Фиг. 32. Пояснение работы спусковой схемы.
а — эквивалентная схема; *б* — нахождение устанавливающихся величин тока.

в точках *1*, *2* и *3*. Для того чтобы определить устойчивые состояния тока в цепи, в каждой из этих точек будем давать ему малые приращения как в сторону его увеличения, так и в сторону уменьшения. Приращения будем давать, сохраняя постоянство питающего схему напряжения U и сопротивления R.

Устойчивыми окажутся две точки: *1* и *3*. В точке же *2* сопротивление N является отрицательным, и поэтому увеличение тока здесь сопровождается уменьшением падения напряжения на этом сопротивлении и соответственно возрастанием падения напряжения IR на сопротивлении R. Таким образом, увеличение тока в этом случае приводит к еще большему его увеличению, а уменьшение — к еще

большему его уменьшению. Следовательно, при положительном приращении тока величина последнего установится соответственно точке *3*, а при отрицательном — соответственно точке *1*.

Рассматриваемая эквивалентная схема, следовательно, имеет два устойчивых состояния. Перевести ее из одного состояния в другое можно небольшим изменением напряжения питания U или же изменением сопротивления R. При увеличении напряжения U достаточно очень малого его приращения, чтобы ток, соответствующий точке *А*, скачком мгновенно достиг значения, соответствующего точке *В*, а при его уменьшении, также скачком,— точке *Г*. Этого же можно добиться, изменяя угол φ, т. е. величину сопротивления R.

Не во всех случаях будет иметь место скачок тока. Он произойдет лишь тогда, когда наклон к оси напряжений вольтамперной характеристики отрицательного сопротивления будет больше соответствующего наклона прямой нагрузки. Условием возникновения скачка, таким образом, является соблюдение неравенства

$$\operatorname{ctg} \varphi_N \leqslant \operatorname{ctg} \varphi$$

или, что то же,

$$R_N \leqslant R.$$

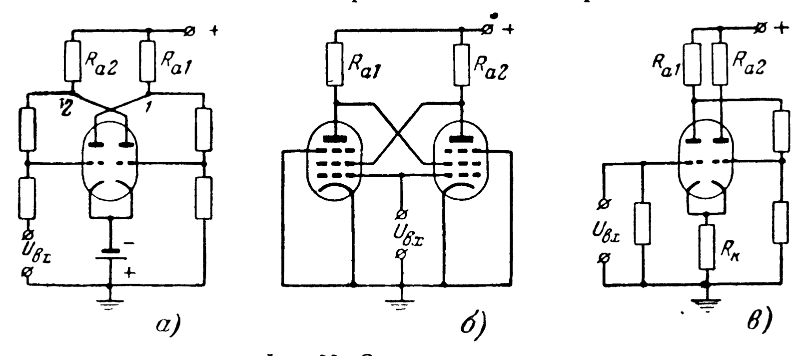
Чем ближе друг к другу проекции точек *А* и *Б* на перпендикуляр, проведенный к прямой нагрузки, тем на меньшую величину нужно изменить питающее схему напряжение U, чтобы добиться скачка тока.

Одним из основных параметров, характеризующих работу спусковой схемы, является крутизна ее характеристики $S_{сп} = \frac{\Delta i_a}{U_{сраб}}$. В этой формуле Δi_a — приращение выходного тока в схеме в момент скачка, а $U_{сраб}$ — внешнее напряжение, при подаче которого происходит этот скачок тока.

Рассмотрим несколько спусковых схем, изображенных на фиг. 33. Схема фиг. 33,*а* с положительной обратной связью по напряжению собрана на одном сдвоенном триоде. Вследствие того что характеристики обеих половин лампы не могут быть строго одинаковы, анодный ток одного из триодов при включении питания растет быстрее. За счет положительной обратной связи на сетку этого триода поступает усиленное напряжение, приводящее к еще более

быстрому его росту. В то же время напряжение обратной связи, поступающее на сетку другого триода, приводит к замедлению роста его анодного тока. Таким образом, в течение весьма малого промежутка времени один триод оказывается полностью открытым, а другой — закрытым. Подключив входное напряжение, можно закрытый триод открыть, а открытые — закрыть. Рассматриваемая спусковая схема между точками *1* и *2* представляет собой нелинейное сопротивление N, а сумма сопротивлений R_{a1} и R_{a2} — сопротивление R, указанные на эквивалентной схеме фиг. 32, *а*.

Крутизна спусковой схемы, собранной на триодах, невелика (порядка 2 *ма/в*). При входных сигналах, меньших 0,1 *в*, эта схема может срабатывать самопроизвольно.



Фиг. 33. Спусковые схемы.

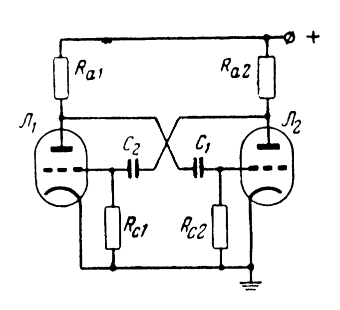
а — схема с обратной связью по напряжению; *б* — схема с обратной связью по напряжению, подаваемому на экранные сетки ламп; *в* — схема с обратной связью по току.

В схеме фиг. 33,*б* положительная обратная связь по напряжению подается на экранные сетки пентодов. Схема требует очень малой мощности управления, так как управляющие сетки ее ламп не связаны с цепью положительной обратной связи. Схема позволяет довольно просто производить управление ее параметрами. Например, увеличение сопротивления анодных нагрузок R_{a1} и R_{a2} или же увеличение напряжения анодного питания приводит к изменению величин напряжений срабатывания и отпускания.

В спусковой схеме фиг. 33,*в* применена положительная обратная связь по току через сопротивление $R_к$, включенное в катодные цепи сдвоенного триода. Эта схема нашла широкое применение вследствие отчетливого и рез-

кого срабатывания от сигналов с медленным и быстрым изменением напряжения. Ее недостатком является большое напряжение срабатывания. Например, в схеме, собранной на лампе 6Н7С, оно колеблется от 20 до 70 *в* (при $\Delta i_a = 10$ *ма*). Напряжение срабатывания растет с ростом сопротивления $R_к$, напряжение же отпускания от последнего не зависит. Схема часто применяется в сочетании с предварительным усилителем постоянного тока, питающимся от того же источника анодного напряжения.

Генераторы релаксационных колебаний. Генераторы релаксационных колебаний создают колебания несинусоидальной формы. Энергия, запасаемая в одни моменты времени в реактивных сопротивлениях такого генератора, в другие моменты времени расходуется в активных сопротивлениях. Релаксационные генераторы могут быть построены на R и C, а также на R и L.



Фиг. 34. Схема мультивибратора.

Для создания незатухающих релаксационных колебаний отрицательное сопротивление должно вносить значительно бо̀льшую энергию в контур, где они возникают, чем в генераторе синусоидальных колебаний. Поэтому в схемах релаксационных генераторов, где отрицательное сопротивление создается с помощью положительной обратной связи, последняя должна быть более сильной, чем в подобных же генераторах синусоидальных колебаний. За счет больших потерь энергии к. п. д. релаксационных генераторов ниже, чем у синусоидальных.

Некоторое сходство с работой рассмотренных выше спусковых схем имеют генераторы импульсов, называемые *мультивибраторами*. Они являются релаксационными генераторами и содержат, кроме сопротивлений, еще и конденсаторы, являющиеся накопителями энергии.

Мультивибратор, схема которого приведена на фиг. 34, представляет собой два связанных между собой усилительных каскада на сопротивлениях. Выходное напряжение первого из них воздействует на вход второго, а выходное напряжение второго — на вход первого. Мультивибратор, как и спусковая схема, представляет собой систему с поло-

жительной обратной связью. Существенная особенность работы мультивибратора состоит в том, что положительная обратная связь у него осуществляется через накопители энергии, т. е. через конденсаторы C_1 и C_2. В нем автоматически происходят скачки тока, подобные соответствующим скачкам в спусковой схеме.

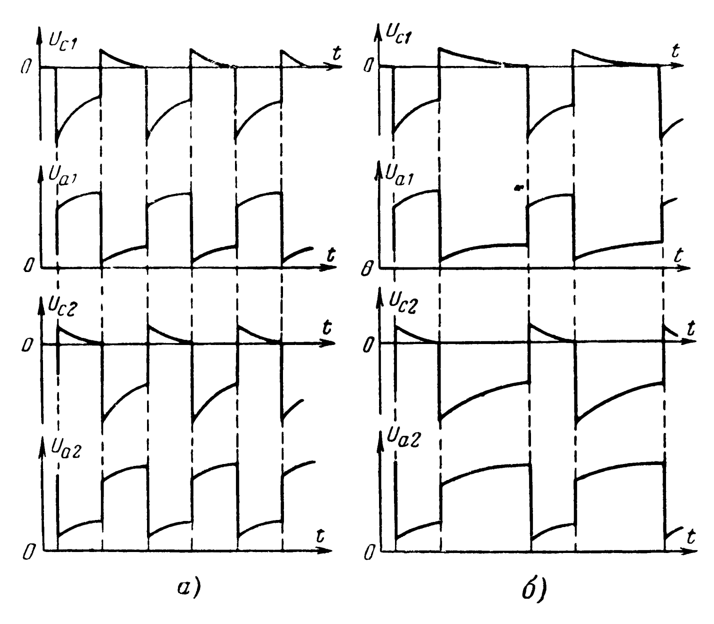
Моменты перехода из одного граничного состояния в другое определяются процессами разряда конденсаторов C_1 и C_2. Конденсатор C_1 разряжается на сопротивление R_{c2} через открытую в это время лампу $Л_2$, а конденсатор C_2 — на R_{c1} через лампу $Л_1$. Период колебаний мультивибратора, таким образом, определяется постоянными времени цепей разряда этих конденсаторов. Если они одинаковы для каждой из цепей, т. е. $C_1 = C_2$, а $R_{c1} = R_{c2}$, то мультивибратор называется симметричным и время его нахождения в каждом из граничных состояний одинаково. В несимметричном мультивибраторе изменением величин анодных сопротивлений R_{a1} и R_{a2} можно добиться изменения ширины генерируемых импульсов.

Генерирование электрических колебаний в мультивибраторе можно объяснить также следующим образом. Так как в мультивибраторе, представляющем собой двухкаскадный усилитель на сопротивлениях, выходное напряжение второго каскада целиком подается на вход первого каскада, то в последнем осуществляется 100-процентная положительная обратная связь. Если этот двухкаскадный усилитель рассчитан на равномерное пропускание сравнительно широкой полосы частот, то условия его самовозбуждения вследствие сильной положительной обратной связи осуществляются одновременно для многих частот. Поэтому форма генерируемых мультивибратором колебаний является несинусоидальной. Это объясняется тем, что несинусоидальное напряжение можно представить состоящим из ряда синусоидальных напряжений.

Продолжительность генерируемых мультивибратором импульсов определяется частотной характеристикой двухкаскадного усилителя в области низких частот, а крутизна их нарастания — частотной характеристикой в области высоких частот. Формы напряжений на электродах ламп симметричного и несимметричного мультивибраторов показаны на фиг. 35. Мгновенные напряжения на сетках ламп мультивибратора не имеют вида идеальных прямоугольников, потому что напряжения на конденсаторах C_1 и C_2,

являющихся накопителями энергии, не могут изменяться мгновенно. Плавные участки кривых соответствуют зарядам и разрядам конденсаторов C_1 и C_2.

Существует много разновидностей основной схемы мультивибратора. Формы напряжений на электродах ламп каждой из них отличаются от приведенных. Схема, изображенная на фиг. 36,*а*, дает возможность получения колебаний треугольной формы (фиг. 36,*б*). Напряжение такой формы можно снять с катодов ламп $Л_1$ и $Л_2$.



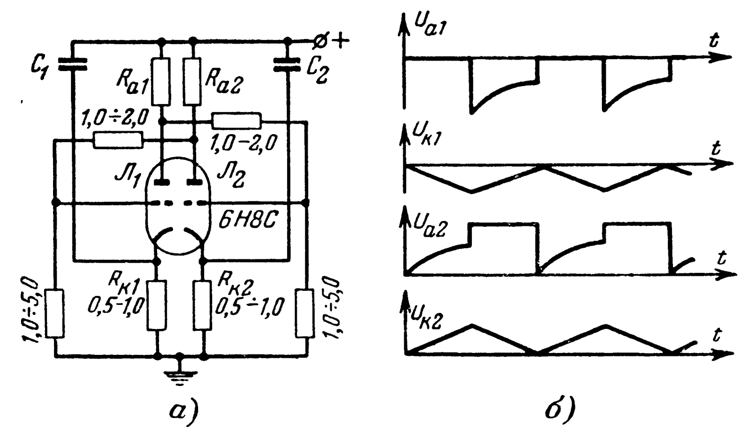
Фиг. 35. Формы напряжений на электродах ламп мультивибратора.
а — симметричного; *б* — несимметричного.

В ряде случаев применяются мультивибраторы с положительным смещением. Их схема отличается от основной (фиг. 34) тем, что заземленные в основной схеме выводы от сопротивлений R_{c1} и R_{c2} присоединяются к „плюсу" анодного напряжения. Мультивибратор такого типа при тех же параметрах входящих в него элементов может генерировать колебания с меньшим периодом, чем мультивибратор, собранный по основной схеме.

Мультивибратор нашел широкое применение в современных радиотехнических устройствах. Он используется

непосредственно как генератор прямоугольных импульсов, делитель или умножитель частоты, источник ряда стабильных частот и т. д.

Умножение частоты можно получить путем синхронизации мультивибратора на его основной частоте напряжением, частота которого подлежит умножению, а деление — за счет синхронизации мультивибратора на одной из его высших гармоник. Синхронизация осуществляется за счет того, что при напряжении на одном из конденсаторов мультивибратора C_1 или C_2 (см. фиг. 34), близком к напряжению, при котором лампа начинает отпираться, приложенный извне синхронизирующий импульс соответствующей полярности быстро, скачком, переводит схему в другое состояние. Если синхронизировать мультивибратор напряжением стабильной частоты, то частоты всех его гармоник будут также стабильными. В этом случае мультивибратор будет представлять собой источник напряжения ряда стабильных частот.

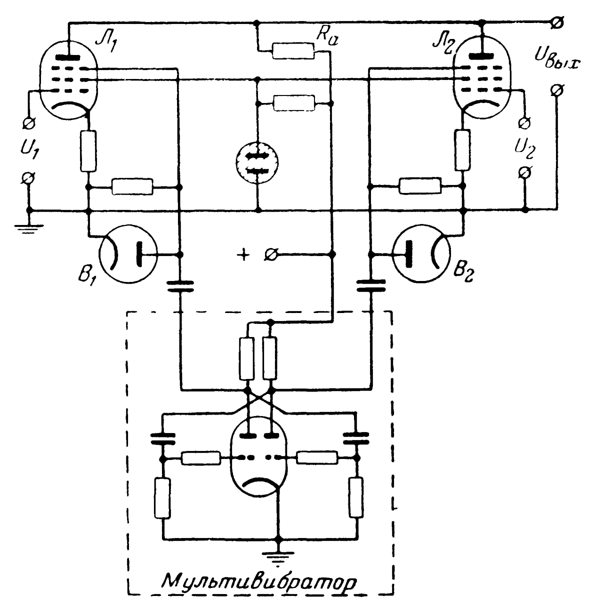


Фиг. 36. Разновидность схемы мультивибратора и формы напряжений на электродах его ламп.

В качестве одного из примеров использования мультивибратора рассмотрим упрощенную схему электронного переключателя для осциллографа (фиг. 37), в которой мультивибратор выполняет роль генератора импульсов. Такой переключатель поочередно подключает ко входу осциллографа два напряжения U_1 и U_2, форму которых необходимо наблюдать на экране осциллографа одновременно.

Электронный переключатель содержит два усилительных каскада на лампах $Л_1$ и $Л_2$, работающих на общее сопротивление нагрузки R_a. Напряжение, снимаемое с сопротивления R_a через усилитель, имеющийся в осциллографе, подается на отклоняющие пластины электроннолучевой трубки. На вход каждой из ламп $Л_1$ и $Л_2$ подаются исследуемые напряжения U_1 и U_2.

Напряжение переменного тока прямоугольной формы, снимаемое с мультивибратора через выпрямители B_1 и B_2, поступает на защитные сетки ламп $Л_1$ и $Л_2$, поочередно

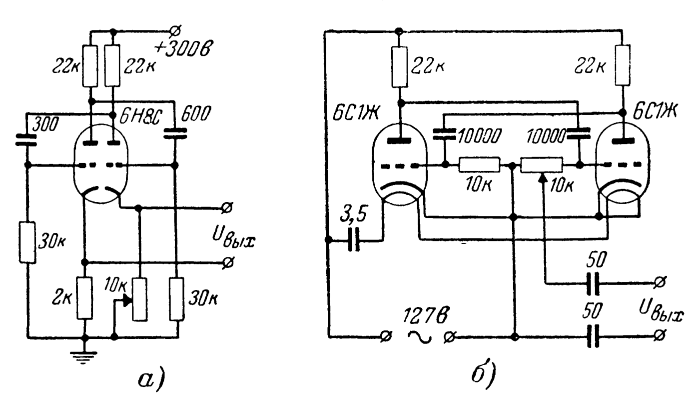


Фиг. 37. Применение мультивибратора в схеме электронного переключателя осциллографа.

запирая каждую из ламп. Таким образом, производится переключение напряжений, поступающих на отклоняющие пластины трубки осциллографа. При этом на экране трубки видны пунктирные кривые, отображающие форму обоих напряжений U_1 и U_2.

Две практических схемы мультивибраторов изображены на фиг. 38. Первая (фиг. 38,*а*) собрана на двойном триоде типа 6Н8С, а вторая (фиг. 38,*б*) на триодах типа 6С1Ж. Уровень выходного напряжения в первой и второй схемах

можно изменять перемещением движка переменного сопротивления 10 *ком*. Схема фиг. 38,*б* целиком питается от сети переменного тока напряжением 127 *в*. Нити накала ламп 6С1Ж соединяются последовательно и через конденсатор 3,5 *мкф* получают питание от сети переменного тока. Вследствие того что в этой схеме аноды ламп питаются непосредственно переменным током, импульсы выходного напряжения имеют более сложную форму, чем у обычного



Фиг. 38. Практические схемы мультивибраторов.
а — с питанием анодных цепей постоянным током; *б* — с полным питанием от сети переменного тока.

мультивибратора. Такой мультивибратор сконструирован и применен В. И. Лазаревым и Н. К. Лукьянчиковым для отыскания неисправностей в радиоприемной аппаратуре.

КАСКАД С РЕАКТИВНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ЛАМПОВЫХ РЕАКТИВНОСТЕЙ

В современных радиотехнических устройствах различного назначения широко используются отдельные элементы, представляющие собой каскады с реактивной обратной связью. Они являются *управляемыми реактивными сопротивлениями*. В случае их применения совместно с ламповыми генераторами для управления частотой последних они называются *управителями частоты*. Реактивная обратная связь применяется и в других ламповых каскадах.

Существуют четыре основные простейшие схемы осуществления ламповых реактивностей (фиг. 39). Каждая из

них состоит из лампы и делителя напряжения, содержащего реактивное сопротивление. Этот делитель напряжения иногда называют *фазирующей ветвью.* Он осуществляет сдвиг по фазе, в результате которого напряжение на сетке лампы, а следовательно, и анодный ток сдвинуты по фазе относительно переменного напряжения на аноде на угол, близкий к 90°. Поэтому сопротивление, представляемое лампой переменному току, оказывается реактивным.

Для того чтобы делитель напряжения создавал сдвиг фаз, близкий к 90°, в схемах фиг. 39,*а* и *г* должны выполняться следующие неравенства: $\omega L_o \gg R_o$ и $\frac{1}{\omega C_o} \gg R_o$. При этом переменное напряжение на сетке лампы получается малым, и потому ламповые реактивности обычно собираются на пентодах, имеющих большой коэффициент усиления. В схемах, изображенных на фиг. 39,*а* и *б*, лампа играет роль индуктивности, а на фиг. 39,*в* и *г* — емкости.

Каждая из этих четырех схем может быть заменена двумя эквивалентными, последовательно соединенными сопротивлениями $R_{экв}$ и $X_{экв}$. Если принять, что ток через фазирующую ветвь значительно меньше тока через электронную лампу и пренебречь внутренним сопротивлением лампы R_i, то можно получить следующие выражения для активного и реактивного эквивалентных сопротивлений:

для схем фиг. 39,*а* и *б*

$$R_{экв} = \frac{1}{S} \text{ и } X_{экв} = \frac{\omega \tau_{ф}}{S}, \text{ т. е. } L_{экв} = \frac{\tau_{ф}}{S};$$

для схем фиг. 39,*в* и *г*

$$R_{экв} = \frac{1}{S} \text{ и } X_{экв} = \frac{1}{\omega \tau_{ф} S}, \text{ т. е. } C_{экв} = \tau_{ф} S.$$

В этих формулах $\tau_{ф}$ — постоянная времени фазирующей ветви, а S — крутизна лампы. Для цепей с индуктивным сопротивлением

$$\tau_{ф} = \frac{L_o}{R_o},$$

а для цепей с емкостным сопротивлением

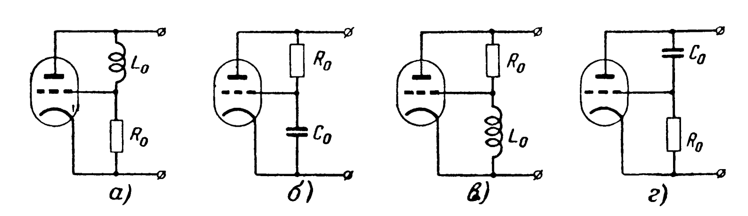
$$\tau_{ф} = R_o C_o.$$

Если не пренебрегать внутренним сопротивлением лампы и считать, что оно присоединено параллельно фазирующей

ветви, то для схем фиг. 39,*а* и *г* получим следующие выражения для эквивалентных сопротивлений:

$$R_{экв} = \frac{R_i [R_o^2 + p^2 (1 + \mu)]}{R_o^2 + p^2 (1 + \mu)^2} \text{ и } X_{экв} = \frac{R_i p \mu}{R_o^2 + p^2 (1 + \mu)^2},$$

где p — величина реактивного сопротивления; для схемы фиг. 39,*а* $p = \omega L_o$, а для схемы фиг. 39,*г* $p = -\frac{1}{\omega C_o}$.

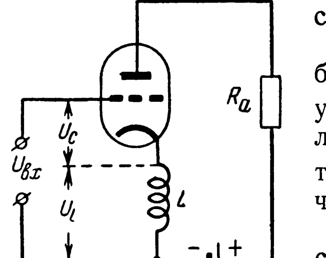


Фиг. 39. Схемы с реактивной обратной связью по напряжению.

Если построить зависимость $X_{экв}$ от частоты, то можно убедиться в том, что до частоты $\omega = \frac{1}{\tau_{ф} (1 + \mu)}$ ламповая реактивность будет представлять собой отрицательную индуктивность, а для более высоких частот — обычную емкость.

Как это следует из приведенной более точной формулы, для $R_{экв}$, учитывающей внутреннее сопротивление лампы R_i, эквивалентное активное сопротивление зависит от частоты

С помощью приведенных простейших схем нельзя получить чисто реактивных сопротивлений, у которых $R_{экв} = 0$. Добротность таких ламповых реактивностей мала, но, несмотря на это, они с успехом применяются во многих случаях. Во всех этих схемах применена реактивная обратная связь по напряжению.



Фиг. 40. Схема с реактивной обратной связью по току.

Используются также схемы с реактивной обратной связью по току. В приведенной на фиг. 40 схеме этого вида лампа представляет собой индуктивность $L_{экв} = \mu L$.

УПРАВИТЕЛИ ЧАСТОТЫ

Одним из применений схем ламповых реактивностей является их использование в качестве частотных модуляторов-управителей частоты ламповых генераторов. С этой целью такую схему присоединяют параллельно колебательному контуру лампового генератора. Управители частоты собирают обычно на лампах с удлиненной характеристикой, с тем чтобы при подаче на одну из сеток напряжения звуковой частоты соответственно изменялись параметры ламповой реактивности.

К основным требованиям, предъявляемым к управителям частоты, относятся следующие:

1. Получение максимального изменения частоты $\Delta\omega$ при одном и том же изменении управляющего напряжения постоянного тока, приложенного к сетке лампы управителя частоты.

2. Обеспечение минимальной паразитной амплитудной модуляции лампового генератора.

Обозначим для упрощения выражение $\frac{\Delta\omega \cdot 100\%}{\omega}$ через $\omega\%$. Рассматривая управитель частоты как одно целое с генератором, можно найти для каждой из приведенных схем $\omega\%$ и сопротивление ΔR, вносимое управителем частоты в колебательный контур. Сопротивление ΔR — это пересчитанное эквивалентное сопротивление, которое как бы включено последовательно (с L и C) в контур.

Для схем фиг. 39,*а* и *б*, являющихся индуктивностями, при условии что ток в фазирующей ветви значительно меньше анодного тока

$$\omega\% = -\frac{SL}{2}\,\frac{\omega^2\tau_{ф}}{1+\omega^2\tau_{ф}^2}$$

и

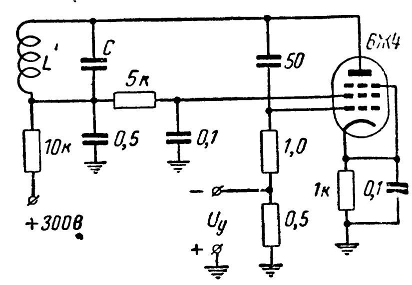
$$\Delta R = SL^2\,\frac{\omega^4\tau_{ф}}{1+\omega^2\tau_{ф}^2}.$$

По этим формулам можно построить графики (фиг. 41), из которых следует, что ΔR растет с ростом частоты значительно быстрее, чем $\omega\%$. Поэтому на какой-то частоте $\omega_{кр}$ колебания в системе из генератора и управителя частоты срываются. Большие $\omega\%$ получаются при таких больших ΔR, при которых колебания становятся невозможными. Поэтому труднее получить необходимую величину $\omega\%$ на более высоких частотах.

Практическая схема управителя частоты изображена на фиг. 42. Она собрана на пентоде типа 6Ж4. Лампа упра-

вителя получает анодное питание через колебательный контур L и C лампового генератора. Схема лампового генератора на фиг. 42 не показана. Сопротивление 10 *ком* и конденсатор 0,5 *мкф* образуют в цепи анодного питания развязывающий фильтр. Для этой же цели в цепи экранной сетки служат сопротивление 5 *ком* и конденсатор 0,1 *мкф*.

Фазирующая ветвь, за счет которой подключенная к ко-



Фиг. 41. Зависимость ω% управителя частоты и вносимого им в контур активного сопротивления ΔR от частоты.

Фиг. 42. Практическая схема управителя частоты.

лебательному контуру схема представляет собой емкостное управляемое сопротивление, состоит из последовательно включенных сопротивлений 1 и 0,5 *мгом* и конденсатора 50 *пф*.

ЛАМПОВАЯ РЕАКТИВНОСТЬ ВЫСОКОЙ ДОБРОТНОСТИ

На фиг. 43 изображены скелетная, эквивалентная и принципиальная схемы ламповой реактивности высокой добротности. Здесь применяется параллельная реактивная обратная связь. На вход усилителя с коэффициентом усиления K, кроме входного напряжения $U_{вх}$, через реактивное сопротивление X поступает также выходное напряжение. Принимая входное сопротивление усилителя очень высоким, ток I во входной цепи согласно эквивалентной схеме (фиг. 43,*б*) можно считать равным разности напряжений $U_{вх}-KU_{вх}$, поделенной на сопротивление всей схемы $Z_{полн}$. Последнее состоит из выходного сопротивления усилителя $R_{вых}$, которое он представляет для переменного тока на своих выходных зажимах, и из реактивного сопротивлеяни X

Входное эквивалентное сопротивление всей схемы

$$Z_{вх.\,экв} = \frac{U_{вх}}{I}.$$

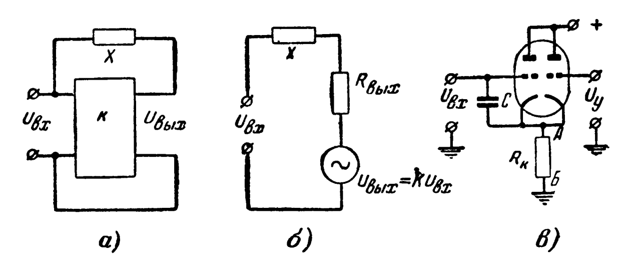
Но так как

$$I = \frac{U_{вх} - KU_{вх}}{Z_{полн}} = \frac{U_{вх}(1-K)}{Z_{полн}},$$

то

$$Z_{вх.\,экв} = \frac{U_{вх}}{\frac{U_{вх}(1-K)}{Z_{полн}}} = \frac{Z_{полн}}{1-K}.$$

Из последней формулы следует, что сопротивление $Z_{вх}$ является управляемым, так как можно изменять коэффициент усиления K усилителя. Это сопротивление повторяет



Фиг. 43. Схемы ламповой реактивности высокой добротности.

а — скелетная схема; *б* — эквивалентная схема; *в* — принципиальная схема.

характер сопротивления $Z_{полн}$, но по величине меньше его в $(1-K)$ раз. Добротность полученной ламповой реактивности определяется отношением $\frac{X}{R_{вых}}$.

Изменять коэффициент усиления K можно различными способами; один из них применен в схеме фиг. 43,*в*. В ней левая половина сдвоенного триода является усилителем, а емкость C играет роль реактивности X. Правая половина лампы, как и левая, является катодным повторителем. Обе половины лампы работают на общую нагрузку $R_к$. Вследствие этого при изменении управляющего напряжения U_y меняется выходное сопротивление (в точках $А$ и $Б$) пра-

вого катодного повторителя, а следовательно, и нагрузочное сопротивление и соответственно коэффициент усиления левого. Кроме происходящего изменения сопротивления нагрузки левого триода, за счет изменения напряжения смещения изменяется и его крутизна, т. е. осуществляется двойное управление коэффициентом усиления. В схеме рационально применить лампу типа 6Н9С. В этом случае при изменении сеточного напряжения управляющего триода на $\pm 0,5$ *в* можно получить трехкратное изменение величины ламповой реактивности. Добротность ее в диапазоне частот $50 \div 75$ *кгц* лежит в пределах $30 \div 50$.

Если в последней схеме вместо конденсатора C применить катушку индуктивности, то получим управляемую индуктивность. Подобный способ создания ламповых реактивностей применяется в некоторых генераторах.

КАСКАД С КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

ГЕНЕРАТОРЫ НА R И C

Выше указывалось, что за счет обратной связи лампа может представлять собой комплексное сопротивление, содержащее активную составляющую в виде отрицательного сопротивления и реактивную составляющую в виде индуктивного сопротивления. Поэтому могут быть построены генераторы, составными элементами которых, кроме ламп, являются лишь сопротивления и конденсаторы.

Генераторы на R и C имеют преимущества перед обычными генераторами, так как они не содержат громоздких и нестабильных деталей в виде катушек индуктивности. Такие генераторы могут создавать колебания с частотами от долей герца до десятков миллионов герц.

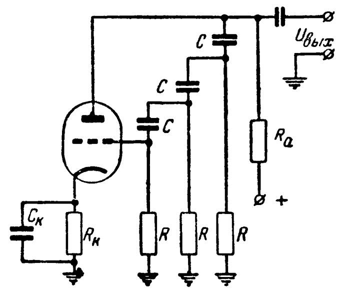
Кроме положительной и реактивной обратных связей, в современных генераторах на R и C широко используются отрицательная и нелинейная обратные связи.

В контуре обычного генератора обязательно наличие емкости и индуктивности. В генераторе на R и C роль индуктивности выполняет лампа за счет применения реактивной обратной связи.

Генератор на R и C можно представить состоящим из усилительного лампового каскада (одного или нескольких) и четырехполюсника обратной связи. Коэффициент передачи напряжения у такого четырехполюсника зависит от ча-

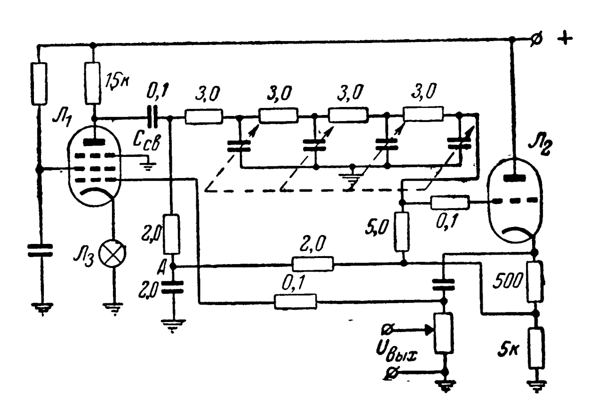
стоты. Четырехполюсник обратной связи осуществляет поворот напряжения по фазе на необходимый угол и может быть как активным, так и пассивным. Так как реактивное сопротивление лампы в схеме генератора на R и C должно иметь индуктивный характер, а активное сопротивление должно быть отрицательным, то четырехполюсник обратной связи должен осуществлять поворот по фазе на угол $\varphi > 180°$.

Одна фазирующая ветвь, содержащая последовательно соединенные R и C, может осуществить поворот по фазе на угол $\varphi < 90°$, поэтому простейший генератор на R и C (фиг. 44) содержит четырехполюсник обратной связи, состоящий из трех таких фазосдвигающих ветвей. Вследствие того что каждая ветвь понижает напряжение, подводимое к сетке лампы, такой генератор может быть построен только на триодах с большим коэффициентом усиления или же пентодах. Число фазосдвигающих ветвей в генераторе может быть и больше трех.



Фиг. 44. Схема цепочечного генератора синусоидальных колебаний на R и C.

Частота колебаний генератора на R и C определяется параметрами четырехполюсника обратной связи. Формулы,



Фиг. 45. Схема цепочечного генератора на R и C.

по которым можно вычислить частоту колебаний генераторов с различным числом фазосдвигающих ветвей, приведены в таблице (стр. 70).

Принципиальная схема генератора на R и C, перекрывающего с помощью счетверенных переменных конденсаторов фазосдвигающих ветвей диапазон частот от 250 до 5 000 *гц*, приведена на фиг. 45. Выходное напряжение усилительного каскада, собранного на лампе $Л_1$, поступает через конденсатор $C_{св}$ на четырехзвенную фазосдвигающую цепь. Ее выходное напряжение воздействует на сетку

Число фазосдвигающих ветвей генератора	Частота генерируемых колебаний	Число фазосдвигающих ветвей генератора	Частота генерируемых колебаний
3	$f = \frac{0,8}{RC}$	5	$f = \frac{0,23}{RC}$
4	$f = \frac{0,38}{RC}$	6	$f = \frac{0,16}{RC}$

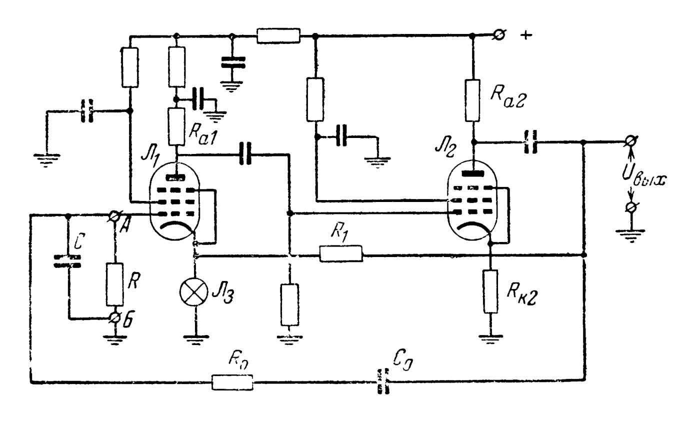
Примечание. Здесь f выражено в герцах, R — в мегомах и C — в микрофарадах.

лампы $Л_2$ катодного повторителя. Последний применяется вследствие того, что он имеет высокое входное сопротивление. Катодный повторитель не изменяет фазы напряжения. Его выходное напряжение поступает на сетку усилительной лампы $Л_1$, а также на нагрузку. Для ограничения сеточных токов в сеточные цепи ламп включены ограничивающие сопротивления по 100 *ком*. Выход усилительной лампы $Л_1$ связан с нагрузкой катодного повторителя через два сопротивления по 2 *мгом*, которые заземляются в точке A через конденсатор 2 *мкф*. Назначением этой цепи является уменьшение тока утечки, который, протекая через конденсатор $C_{св}$ и сопротивление 5 *мгом*, создает положительное смещение на сетке лампы $Л_2$. Конденсатор емкостью 2 *мкф* необходим для фильтрации напряжения звуковой частоты. В этой схеме желательно применять переменные конденсаторы с керамической изоляцией и тщательно изолировать элементы фазосдвигающей цепи.

При необходимости перекрытия большего диапазона частот в цепочечных генераторах на R и C используют несколько фазосдвигающих цепей, каждая из которых включается на одном из поддиапазонов генератора.

Принцип построения ламповых реактивностей высокой добротности, рассмотренный выше, применяется также для создания генераторов на R и C.

Если усилитель по схеме фиг. 43 имеет четное число каскадов, а коэффициент его усиления больше единицы, то эквивалентное входное сопротивление $Z_{вх.\,экв}$ усилителя с реактивной обратной связью по напряжению будет со-



Фиг. 46. Схема генератора на R и C с двухкаскадным усилителем и цепью обратной связи.

держать активную составляющую в виде отрицательного сопротивления и реактивную составляющую в виде отрицательной емкости. Таким образом, например, двухкаскадный усилитель на лампах $Л_1$ и $Л_2$ (фиг. 46) с цепью обратной связи, содержащей конденсатор C_0 и сопротивление R_0, на своих входных зажимах A и $Б$ представляет собой эквивалентное комплексное сопротивление. Активная его составляющая отрицательна, а реактивная представляет собой индуктивное по знаку сопротивление $L_{экв}$, величина которого не растет, а падает с ростом частоты. Если к этим же зажимам присоединить конденсатор C, то образуется колебательный контур, содержащий C и $L_{экв}$. К нему будет подключено эквивалентное отрицательное сопротивление, восполняющее потери в контуре. Схема,

таким образом, явится генератором синусоидальных электрических колебаний. Сопротивление R является в этой схеме лишь сопротивлением утечки сетки; оно предохраняет от запирания лампу $Л_1$.

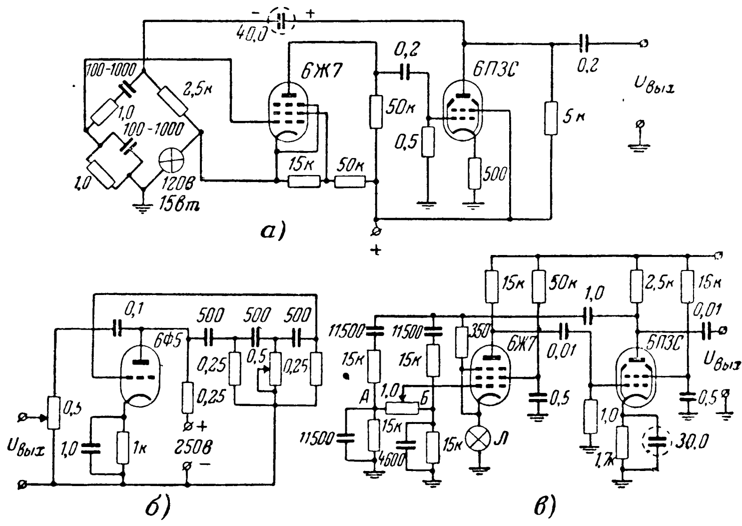
В цепочечной схеме (фиг. 45) и в схеме с двухкаскадным усилителем и цепью реактивной обратной связи (фиг. 46) применена отрицательная нелинейная обратная связь, с помощью которой осуществляется стабилизация выходного напряжения этих генераторов. Для этого в катодные цепи ламп включены инерционные нелинейные сопротивления, представляющие собой электрические лампочки накаливания на 220 *в* и 15 *вт* или несколько последовательно соединенных лампочек по 26 *в* и 0,15 *а*.

При колебаниях анодного тока лампы $Л_1$ в схеме фиг. 45 сопротивление нити лампочки $Л_3$ изменяется и, следовательно, изменяется смещение на сетке лампы. За счет этого стабилизируется переменное напряжение на аноде лампы $Л_1$, а следовательно, и выходное напряжение генератора, так как вторая лампа является катодным повторителем. Проследим, как осуществляется эта стабилизация. Пусть переменное напряжение на аноде лампы увеличится; тогда увеличится и анодный ток. При этом сопротивление электрической лампочки, включенной в катодную цепь, возрастет. Следовательно, возрастет напряжение смещения; поэтому анодный ток уменьшится и примет значение, близкое к тому, которое было до увеличения анодного напряжения.

В схеме фиг. 46 нелинейная отрицательная обратная связь охватывает два каскада усиления. Выходное напряжение генератора в этой схеме поступает через сопротивление R_1 в цепь сетки лампы $Л_1$. При увеличении выходного напряжения напряжение на сопротивлении R_1 останется практически неизменным, а на лампочке $Л_3$ резко увеличится, так как при этом сильно возрастет ее сопротивление. Увеличится и напряжение смещения лампы $Л_1$; вследствие этого упадет коэффициент усиления первого каскада, а следовательно, выходное напряжение генератора примет значение, близкое к первоначальному. Для того чтобы подогрев нити электрической лампочки $Л_3$ за счет анодного тока лампы $Л_1$ был незначительным, этот ток стараются по возможности уменьшить. Так как нелинейное сопротивление, примененное в этих схемах, является инерционным, т. е. его величина может измениться лишь в течение нескольких периодов проходящего через него переменного

тока, а не за долю периода, то процесс стабилизации напряжения не влечет за собой искажения его формы.

Несколько практических схем генераторов на R и C приведено на фиг. 47. Схема фиг. 47, *а* состоит из двухкаскадного усилителя и цепи обратной связи. Она построена так же, как и схема фиг. 46. Частота генерируемых ею колебаний может изменяться либо с помощью сдвоенного переменного конденсатора (100÷1 000 *пф*), либо с помощью сдвоенного переменного сопротивления (1 *мгом*).



Фиг. 47. Практические схемы генераторов на R и C.

Схема фиг. 47, *б* собрана по цепочечной схеме на лампе типа 6Ф5, имеющей большой коэффициент усиления (100). С помощью переменного сопротивления 0,5 *мгом* можно изменять частоту колебаний в пределах 200÷1 000 *гц*. Выходное напряжение снимается с переменного сопротивления 0,5 *мгом*. Нагружать генератор при верхнем положении движка переменного сопротивления 0,5 *мгом* сопротивлением нагрузки, меньшим 0,5 *мгом*, нельзя, так как при этом сильно упадет коэффициент усиления каскада и могут сорваться колебания.

Схема фиг. 47, *в* в отличие от ранее рассмотренных схем с двухкаскадным усилителем и цепью обратной связи допускает изменение частоты с помощью одного, а не двух элементов схемы. В ней частоту можно регулировать пе-

ремещением движка переменного сопротивления 1 *мгом*. При нахождении движка в точке *А* частота определяется параметрами левой цепи обратной связи, а в точке *Б* — правой. Это соответственно определяет начало и конец диапазона частот, перекрываемого звуковым генератором. Во всех остальных положениях движка частота принимает промежуточные значения. Для того чтобы указанные цепи обратной связи не влияли заметно друг на друга, величина связывающего их сопротивления (в данной схеме 1 *мгом*) выбирается в 5 — 10 раз большей наибольшего сопротивления, имеющегося в этих цепях.

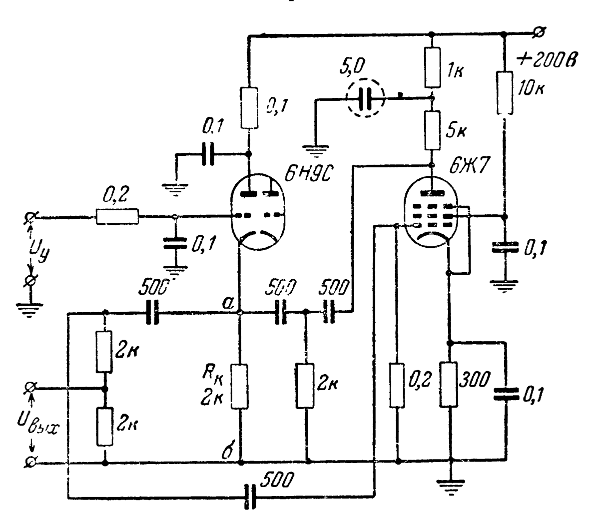
С помощью коммутаторной лампы *Л* (рассчитанной на напряжение 48 *в* и ток 90 *ма*), включенной в катод лампы 6Ж7, и сопротивления 350 *ом* в схеме генератора создается цепь нелинейной отрицательной обратной связи. Благодаря этому его выходное напряжение стабилизируется. Стабилизация происходит за счет того, что при увеличении тока через коммутаторную лампу растет величина ее сопротивления и соответственно растет напряжение отрицательной обратной связи, поступающее во входную цепь. Как показали испытания этой схемы, уход частоты генератора при изменении питающего напряжения на 10% составил 0,2%, а при изменении на 20% — около 1,5%.

Для того чтобы сконструировать по этой схеме генератор на широкий диапазон частот, нужно предусмотреть несколько цепей обратной связи, определяющих частоту генерируемых колебаний и устройство для их переключения.

Вследствие того что частота генератора на *R* и *C* обратно пропорциональна произведению величин *R* и *C* четырехполюсника обратной связи, а не корню квадратному из параметров колебательного контура, как в случае генераторов на *L* и *C*, его часто используют для создания частотно-модулированных колебаний. В этом случае можно достичь значительно большего процентного изменения частоты

Одна из схем, предназначенных для частотной модуляции, изображена на фиг. 48. В ней в качестве частотного модулятора используется управляемое активное сопротивление, которым является катодный повторитель. Генератор на пентоде типа 6Ж7 собран на *R* и *C* по цепочечной схеме. Анодной нагрузкой этой лампы служит сопротивление 5 *ком*. К нему подключен четырехполюсник обрат-

ной связи, представляющий собой цепочку, содержащую три конденсатора по 500 *пф* и три сопротивления по 2 *ком*. Напряжение с выхода четырехполюсника через конденсатор 500 *пф* поступает на сетку лампы генератора. Сопротивление в точках *а* и *б* не равно 2 *ком*. Вследствие того



Фиг 48. Практическая схема генератора с частотной модуляцией, использующая катодный повторитель в качестве управляемого активного сопротивления.

что сопротивление $R_к = 2$ *ком* является нагрузкой катодного повторителя, сопротивлением $R_{аб}$ будет служить выходное сопротивление катодного повторителя, равное

$$R_{вых} = \frac{R_к}{1 + SR_к}.$$

Так как крутизна S лампы типа 6Н9С равна 1,6 *ма/в*, то

$$R_{вых} = \frac{2\,000}{1 + 1{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot 2\,000} = 480 \text{ ом}.$$

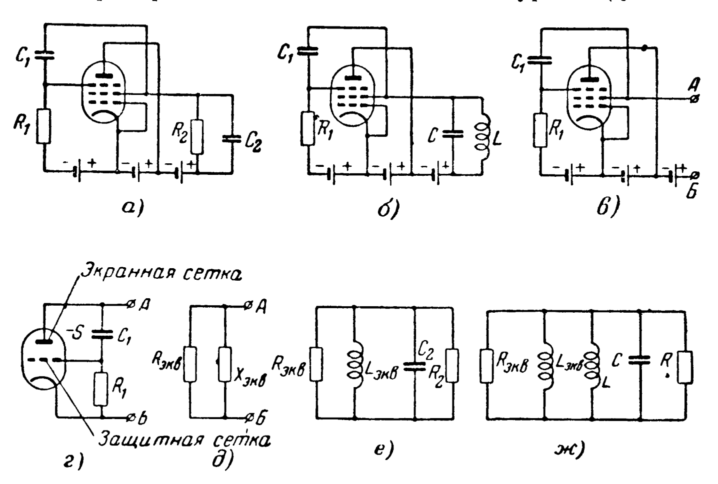
При изменении крутизны этой лампы за счет воздействия на нее управляющего напряжения U_y постоянного тока будут изменяться $R_{вых}$ и соответственно частота генерируемых колебаний, определяющаяся параметрами цепочки обратной связи.

В схеме применен ряд развязывающих фильтров. Они поставлены в анодные цепи ламп и в цепь управляющей сетки частотного модулятора.

Во сколько раз с помощью U_y можно изменить $R_{вых}$, во столько же раз изменится и частота генерируемых электрических колебаний. Крутизна лампы 6Н9С при изменении напряжения U_y в диапазоне -4 *в* $\div -16$ *в* меняется от $S = 1{,}6$ *ма/в* до $S = 0{,}2$ *ма/в*. При этом $R_{вых}$ меняется от 480 до 1 430 *ом*. Поэтому частоту можно изменить в 3 раза.

ТРАНЗИТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

В настоящее время нашли распространение транзитронные генераторы на *R* и *C* (фиг. 49,*а*), а также транзитронные генераторы с колебательными контурами (фиг. 49,*б*).



Фиг. 49. Схемы транзитронных генераторов.

а — схема генератора на *R* и *C*; *б* — схема с колебательным контуром; *в* — принципиальная схема основной части генератора; *г* — эквивалентная схема основной части транзитронного генератора; *д* — упрощенная эквивалентная схема основной части транзитронного генератора; *е* — эквивалентная схема генератора на *R* и *C*; *ж* — эквивалентная схема генератора с колебательным контуром.

Основную часть транзитронного генератора можно представить в виде обычного управителя частоты (фиг. 49,*в*). Его основное отличие от ламповой реактивности состоит в том, что саму лампу в этом случае можно представить имеющей отрицательную крутизну. На фиг. 49,*г* изображена эквивалентная схема основной части транзитронного гене-

ратора. Защитной и управляющей сеткам транзитронного генератора соответствуют управляющая сетка и анод эквивалентной схемы. Увеличение потенциала защитной сетки, не влияя на катодный ток, вызывает увеличение анодного тока и, следовательно, уменьшение тока экранной сетки. На эквивалентной схеме это означает убывание анодного тока при возрастании напряжения на управляющей сетке, что соответствует отрицательной крутизне ($S<0$). Эквивалентную схему фиг. 49,*г* можно заменить упрощенной схемой фиг. 49,*д*, содержащей параллельное соединение отрицательного активного сопротивления

$$R_{экв}=\frac{1}{S}$$

и реактивного сопротивления

$$X_{экв}=\frac{\omega\tau+\frac{1}{\omega\tau}}{S},$$

где $\tau=R_1C_1$ — постоянная времени фазирующей ветви.

Так как ток экранной сетки увеличивается с ростом напряжения, приложенного к ней, и уменьшается с ростом напряжения на защитной сетке, то можно подобрать такой режим, при котором увеличение напряжения, приложенного извне к зажимам *А* и *Б*, будет вызывать уменьшение тока в цепи внешнего источника напряжения. Этим и объясняется получение на зажимах *А* и *Б* составляющей отрицательного активного сопротивления.

Реактивная составляющая полного сопротивления на зажимах *А* и *Б* появляется за счет того, что напряжение, воздействующее на защитную сетку, сдвинуто по фазе относительно напряжения на экранной сетке. Этот сдвиг по фазе осуществляется цепью, содержащей сопротивление R_1 и конденсатор C_1. Общий ток в цепи приложенного извне источника напряжения переменного тока поэтому имеет реактивный характер, а полное сопротивление основной части схемы транзитронного генератора — реактивную составляющую. Так как $X_{экв}$ положительно, то реактивное сопротивление имеет индуктивный характер. Эквивалентная индуктивность этой ветви

$$L_{экв}=\frac{\tau}{S}+\frac{1}{S\omega\tau}.$$

С ростом частоты $R_{экв}$ и $L_{экв}$ уменьшаются.

Для того чтобы схему фиг. 49,*в* превратить в схему генератора (фиг. 49,*а*), достаточно к зажимам *А* и *Б* присоединить сопротивление емкостного характера, например конденсатор C_2, и сопротивление R_2. Эквивалентная схема этого генератора показана на фиг. 49,*е*. Для получения в схеме генерации необходимо, чтобы отрицательное активное сопротивление $R_{экв}$ в точности компенсировало затухание, обусловленное всеми имеющимися положительными сопротивлениями, общую величину которого обозначим R. При этом

$$R_{экв} \leqslant R.$$

В схеме транзитронного генератора на R и C сопротивлению R соответствует параллельное соединение сопротивления R_2 (через которое подается питание на экранную сетку) и внутреннего сопротивления лампы по экранной сетке R_{ic2}, т. е.

$$R = \frac{R_2 R_{ic2}}{R_2 + R_{ic2}}.$$

Генерируемая частота в случае транзитронного генератора на R и C определяется следующим выражением:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 \frac{R_2 R_{ic2}}{R_2 + R_{ic2}} C}} = \frac{1}{\sqrt{\tau_L \tau_C}}.$$

В этой формуле $\tau_C = R \cdot C_2$ — постоянная времени емкостной части генератора, а $\tau_L = R_1 C_1$ — постоянная времени фазирующей ветви лампы, играющей роль индуктивной части генератора.

Если к зажимам *А* и *Б* (фиг. 49,*в*) присоединить колебательный контур, то получится схема генератора (фиг. 49,*б*), эквивалентная схема которого показана на фиг. 49,*ж*. Частота генерируемых колебаний установится такой, при которой контур будет иметь эквивалентное реактивное сопротивление емкостного характера. В этом случае возможны режим управляемой частоты, когда частота зависит от параметров лампы, и режим стабильной частоты, когда такой зависимости не существует.

В режиме стабильной частоты

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{\tau_C}{\tau}} = \sqrt{\omega_0^2 + \frac{1}{\tau_L \tau}},$$

где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\tau_L \tau_C}}$ — собственная частота подключенного к зажимам *А* и *Б* колебательного контура, а $\tau_L = \frac{L}{r}$ и $\tau_C = C \cdot r$ — постоянные времени его индуктивной и емкостной ветвей (с отнесением его сопротивления r к каждой из них).

Такой режим получается при $R_{ic2} \gg R_к$, где $R_к$ — эквивалентное активное сопротивление колебательного контура, которое в параллельном соединении с его реактивным эквивалентным сопротивлением $X_к$ представляет собой эквивалентную схему колебательного контура.

В режиме управляемой частоты, достигаемом при таком выборе параметров схемы, когда $R_к \gg R_{ic2}$,

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 + \frac{1}{R_1 C_1 R_{ic2} C}} = \sqrt{\omega_0^2 + \frac{1}{\tau_L \tau_{ic2}}},$$

где τ_{ic2} — постоянная времени разряда контурного конденсатора C через R_{ic2}. Частота здесь является функцией величины R_{ic2} — внутреннего сопротивления лампы по экранной сетке, которое может меняться от случайных причин или путем подачи дополнительных смещений на электроды лампы.

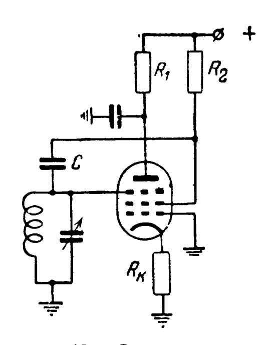
В общем случае, когда нельзя пренебречь ни одним из сопротивлений R_{ic2} и $R_к$, генерируемая частота выражается формулой

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 \left(1 + \frac{rC}{R_1 C_1}\right) + \frac{1}{C R_{ic2} C_1 R_1}}.$$

Транзитронный генератор может быть одновременно использован и как генератор и как управитель частоты; для этого его нужно поставить в режим управляемой частоты. Чаще он используется в режиме стабильной частоты в качестве гетеродина для радиоизмерительных целей, а также в приемниках супергетеродинного типа.

В настоящее время, помимо классической схемы транзитронного генератора (фиг. 49,*а* и *б*), недостатком которой является невозможность заземления роторных пластин переменного конденсатора, нашла применение схема, изображенная на фиг. 50. В ней сопротивления R_1 и R_2 выбраны такими, чтобы обеспечить режим работы лампы, при кото-

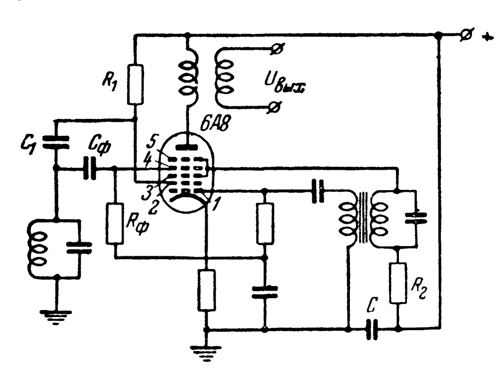
ром анодное напряжение значительно меньше напряжения на экранной сетке и при котором к контуру за счет работы схемы как бы подключается отрицательное сопротивление.



Фиг. 50. Схема транзитронного генератора с заземленными роторными пластинами переменного конденсатора.

Сопротивление $R_к$ служит для обеспечения этого же режима; оно задает необходимое напряжение на защитную сетку и напряжение на управляющую сетку. Фазирующая ветвь в данной схеме состоит из конденсатора *C* и контура. Последний здесь представляет собой активное сопротивление, достаточно большое по своей величине.

Генератор по транзитронной схеме на многоэлектродной лампе, у которой часть ее электродов используется в схеме высокочастотного генератора, а часть — в схеме генератора звуковой частоты, дает возможность получать высокочастотное модулированное напряжение. Схема такого генератора, выполненного на лампе 6А8, приведена на фиг. 51. В ней на соединенных вместе сетках *3* и *5*, заменяющих как бы анод, и сетке *1* собран по обычной схеме генератор звуковой частоты. На сетках *5*, *4* и *2*



Фиг. 51. Схема транзитронного генератора для получения высокочастотного модулированного напряжения.

собран транзитронный генератор. Сопротивления R_1 и R_2 выбираются такими, чтобы напряжение на сетке *2* было больше, чем напряжения на сетках *5* и *4*.

Поясним работу схемы этого транзитронного генератора. Пусть возросло переменное напряжение на контуре (оно же на сетке *2*); тогда возрастает и напряжение на сетке *4*, переданное ей фазирующей ветвью $C_ф R_ф$. Это вызовет увеличение анодного тока и, следовательно, уменьшение тока сетки *2*. Так как при увеличении напряжения на сетке *2* падает ее ток, то можно считать, что к контуру присоединено отрицательное сопротивление. В схеме применена электронная связь. Анодный ток в ней определяется электронным потоком, поступающим на анод из катода. Так как вначале этот поток участвует в генерировании электрических колебаний звуковой частоты, то в дальнейшем высокочастотные колебания оказываются модулированными. С помощью трансформатора высокой частоты модулированные колебания передаются в нагрузку.

БЕЗИНДУКЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ФИЛЬТРЫ

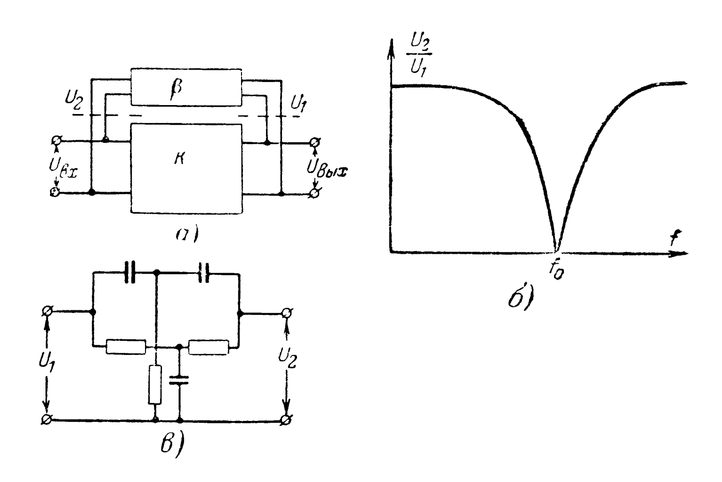
Конструирование узкополосных электрических фильтров для низких звуковых частот затруднено, вследствие того что индуктивность фильтра в них должна иметь значительную величину. Для получения же узкой полосы пропускания фильтра активное сопротивление катушек индуктивности должно быть малым. По этим причинам низкочастотные узкополосные электрические фильтры получаются очень громоздкими и редко применяются.

Большое распространение в настоящее время нашли ламповые каскады с комплексной обратной связью особого вида, не имеющие катушек индуктивности и обладающие фильтрующим действием. Они одновременно выполняют и роль усилителей. Такие фильтры иногда называют безиндукционными. Они (в диапазоне низких звуковых частот) значительно меньше по весу и габаритам, чем обычные фильтры.

На фиг. 52,*а* изображена скелетная схема электронного безиндукционного фильтра. Он представляет собой усилительный ламповый каскад *К*, использующий комплексную параллельную обратную связь. Четырехполюсник обратной связи β должен обладать частотной характеристикой особого вида (фиг. 52,*б*). Отношение амплитуд его выходного и входного напряжений $\frac{U_2}{U_1}$ при какой-то частоте f_0 должно быть равно нулю. Поэтому усилитель с таким четырехполюсником обратной связи при частоте f_0 дает

максимальное усиление, так как составляющая отрицательной обратной связи в этом случае равна нулю. При всех других частотах, отличных от f_0, усилитель будет обладать меньшим коэффициентом усиления.

Четырехполюсник, обладающий такой характеристикой, не содержащий катушек индуктивности, а состоящий только из трех конденсаторов и трех сопротивлений, показан на



Фиг. 52. Электронный безиндукционный фильтр.

а — скелетная схема, *б* — частотная характеристика; *в* — схема четырехполюсника обратной связи.

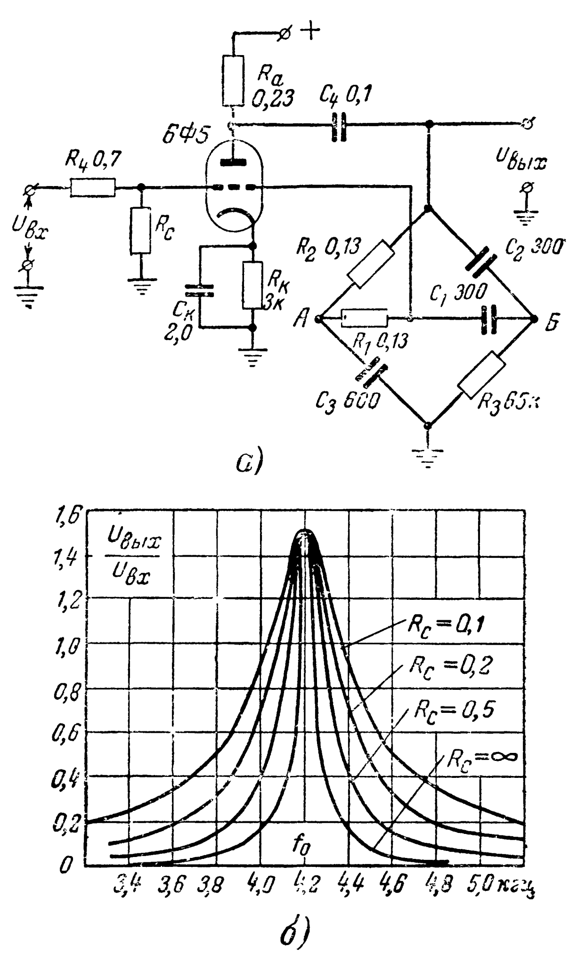
фиг. 52,*в*. Частота f_0, при которой усиление будет максимальным, определяется параметрами четырехполюсника обратной связи.

Кроме схемы четырехполюсника фиг. 52,*в*, применяются и другие схемы, однако ее используют наиболее часто. Эту схему иногда называют двойной T-схемой или схемой двойного моста.

Схема электронного безиндукционного фильтра и его частотные характеристики приведены на фиг. 53.

Как это следует из данных элементов схемы, приведенных на фиг. 53,*а*, величины конденсаторов и сопротивлений четырехполюсника обратной связи выбраны так, что

$$C_1 = C_2 = 2C;\ \ R_1 = R_2 = R;\ \ C_3 = C \text{ и } R_3 = \frac{R}{2}.$$



Фиг. 53. Принципиальная схема электронного безиндукционного фильтра и его частотные характеристики.

В этом случае частоту f_0 можно вычислить по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \cdot$$

Как видно из частотных характеристик (фиг. 53,б), электронный безиндукционный фильтр обладает очень острой кривой избирательности. Острота этой кривой зависит от величины сопротивления R_c, шунтирующего четырехполюс-

ник обратной связи. Чем больше R_c, тем острее кривая избирательности. Чтобы внутреннее сопротивление источника входного напряжения не шунтировало четырехполюсник обратной связи и тем самым не нарушало работы фильтра, в сеточную цепь вводится сопротивление R_4.

Для того чтобы настроить электронный безиндукционный фильтр, нужно в точном соответствии с расчетом и с учетом емкостей монтажа подобрать входящие в него конденсаторы C_1, C_2 и C_3.

Так как в формулу для расчета частоты f_0 не входят параметры электронной лампы, то f_0 практически не меняется при изменении величин напряжений питания в сравнительно большом диапазоне. Частотная характеристика фильтра при этом практически мало изменяется.

Лампа в приведенной схеме безиндукционного фильтра представляет собой комплексное сопротивление, подобное сопротивлению колебательного контура. Ниже частоты f_0 она представляет собой реактивное сопротивление одного, а выше нее — другого знака. При резонансной частоте f_0 она, как и колебательный контур, представляет собой чисто активное сопротивление.

Для пояснения этого рассмотрим крайние случаи, когда частота f входного напряжения очень высока и когда она очень мала по сравнению с f_0.

Когда $f \gg f_0$, то можно считать, что $R_2 \gg \frac{1}{\omega C_3}$ и, следовательно, точка $А$ как бы непосредственно заземлена. Тогда напряжение с анода на сетку лампы поступает через две фазирующие ветви одного вида.

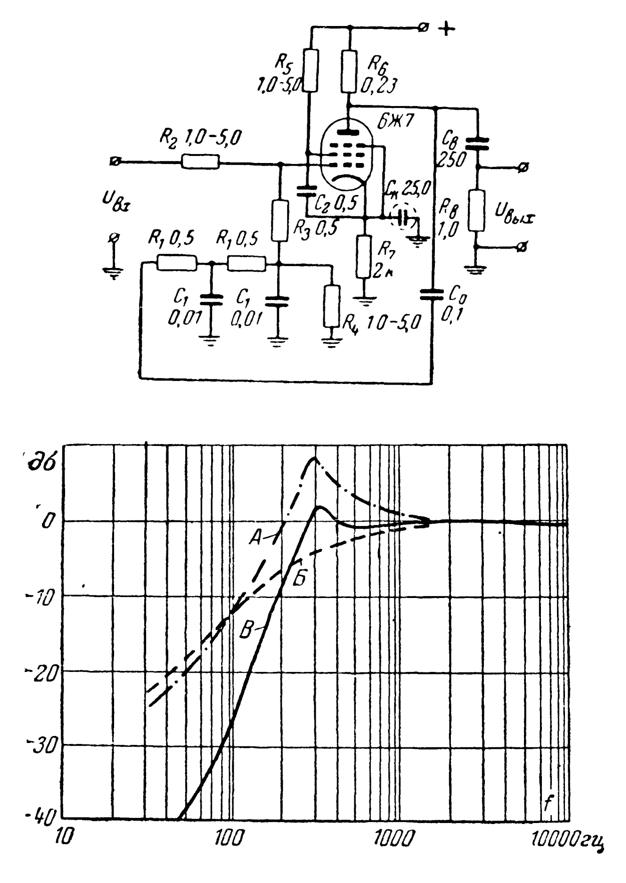
Если же $f \ll f_0$, то $\frac{1}{\omega C_2} \gg R_3$ и точка $Б$ как бы непосредственно заземлена. В этом случае напряжение на сетку лампы поступает через две фазирующие ветви другого вида.

Таким образом, при $f \gg f_0$ и $f \ll f_0$ лампа представляет собой реактивные эквивалентные сопротивления разных знаков.

Наряду с рассмотренными узкополосными безиндукционными электронными фильтрами применяются также схемы подобного типа, являющиеся одновременно фильтрами верхних или нижних частот и усилителями. К ним относятся схемы, изображенные на фиг. 54 и 55. Каждая из них содержит усилительный каскад на лампе 6Ж7, двухзвенную

цепь обратной связи и выравнивающий контур на выходе каскада.

Схема фиг. 54,*а* представляет собой усилитель верхних частот. Цепь ее обратной связи состоит из сопротивлений R_1 и конденсаторов C_1. Выходное напряжение каждого из

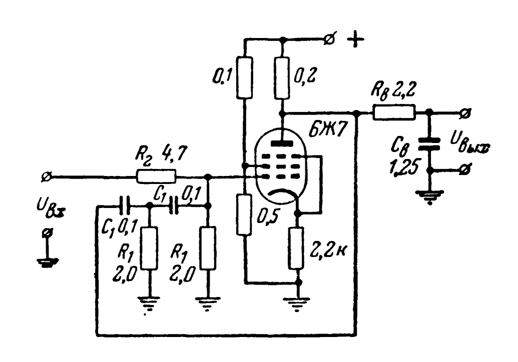


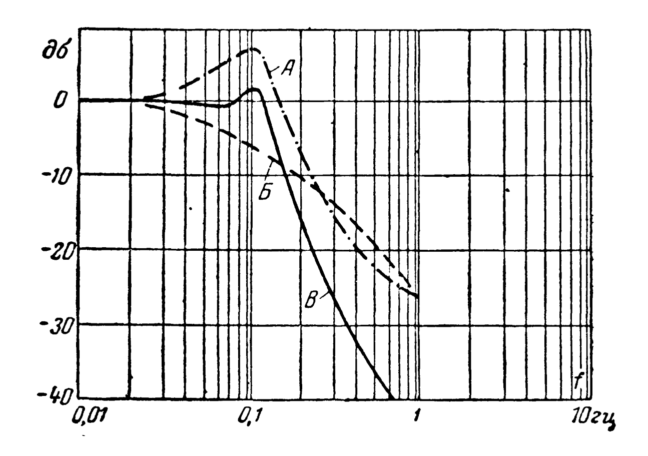
Фиг. 54. Схема и частотные характеристики фильтра верхних частот.

звеньев снимается с конденсаторов C_1. Сопротивления R_2 и R_3 необходимы для того, чтобы не происходило шунтирования напряжения обратной связи внутренними сопротивлениями источника входного сигнала и усилительного каскада. Сопротивление R_4 составляет часть сопротивления

утечки сетки. Сопротивления R_5, R_6, R_7 и конденсаторы C_o, $C_к$ и C_2 являются обычными деталями усилительного каскада.

Частотная характеристика усилителя верхних частот без выравнивающей цепи представлена на фиг. 54 кривой *А*.





Фиг. 55. Схема и частотные характеристики фильтра нижних частот.

Там же показаны частотная характеристика выравнивающей цепи, содержащей $R_в$ и $C_в$ (кривая *Б*), и результирующая частотная характеристика всей схемы в целом (кривая *В*).

Частота среза f_0 приближенно может быть определена по формуле

$$f_0=\frac{\sqrt{K}}{2\pi R_1 C_1},$$

где K — коэффициент усиления каскада, а R_1C_1 — параметры цепи обратной связи.

Схема фиг. 55 представляет собой усилитель нижних частот и отличается от схемы фиг. 54 видом цепи обратной связи. С каждого из ее звеньев напряжение снимается не с конденсаторов, как в схеме фиг. 54, а с сопротивлений R_1. Напряжение же с выравнивающего контура в этом случае снимается с конденсатора $C_в$, а не с сопротивления $R_в$, как на фиг. 54. Сопротивление R_2 выполняет ту же роль, что и в предыдущей схеме. Здесь дополнительно применена отрицательная обратная связь по току. Сопротивление в катоде с этой целью не шунтируется конденсатором. Частотные характеристики усилителя нижних частот (кривая *А*) выравнивающей цепи (кривая *Б*) и схемы в целом (кривая *В*) представлены на фиг. 55. Частота f_0 в этом случае может быть приближенно определена по формуле

$$f_0=\frac{1}{2\pi R_1 C_1 \sqrt{K}}.$$

Обозначения величин в этой формуле те же, что и в предыдущем случае.

Использовав каскадное соединение усилителей верхних и нижних частот, можно получить широкополосную усиливающую и фильтрующую схему. Применение рассмотренных схем особенно рационально в диапазоне низких частот, так как в этом случае исключаются из схемы громоздкие и дорогие индуктивности.

ЛИТЕРАТУРА

И. П. Жеребцов, Радиотехника для радиолюбителей, Связьиздат, 1953.

В. Ф. Власов, Электровакуумные приборы, Связьиздат, 1949.

С. Н. Кризе, Усилители низкой частоты, Воениздат, 1940.

Г. С. Цыкин, Отрицательная обратная связь и ее применения, Связьиздат, 1940.

С. Н. Кризе, Безиндукционные фильтры, „Вестник связи", № 9, 1949.

А. А. Куликовский, Новое в технике радиоприема, Госэнергоиздат, 1950.

А. А. Соколов, Релейные усилители постоянного тока, „Электричество", № 10, 1950.

И. Г. Гольдреер, Стабилизаторы напряжения, Госэнергоиздат, 1952

Цена 2 руб.